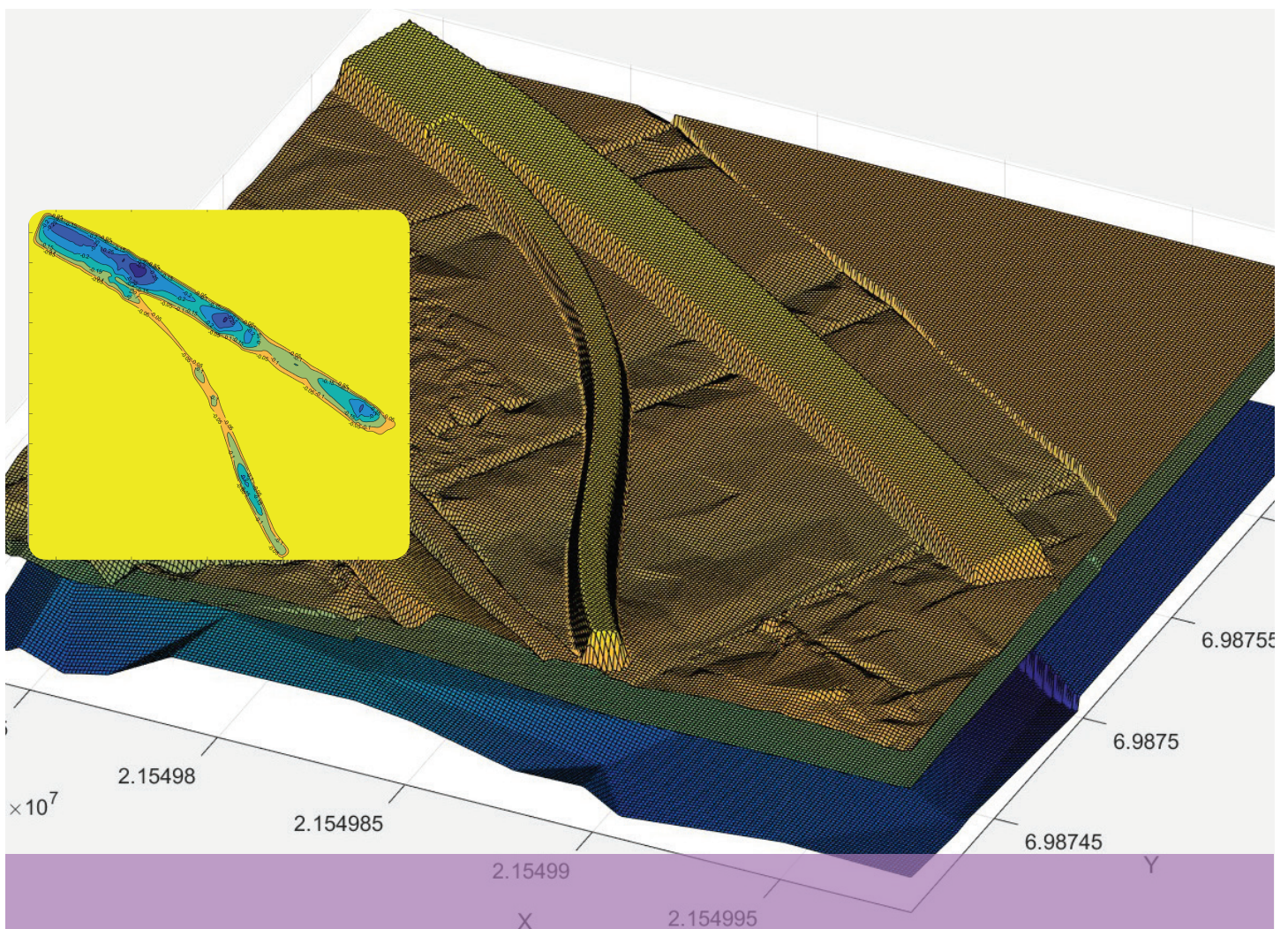


Aatu Eteläsaari

Tietomallin hyödyntäminen tien painumalaskennassa



Aatu Eteläsaari

Tietomallin hyödyntäminen tien painumalaskennassa

Opinnäytetyö 1/2017

Liikennevirasto
Helsinki 2017

Kannen kuvat: Laskentamoottorin tulkitsemat pinnat; painumamatriisin visualisointi

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN 2343-1741
ISBN 978-952-317-336-1

Liikennevirasto
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelin 0295 34 3000

Aatu Eteläsaari: Tietomallin hyödyntäminen tien painumalaskennassa. Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2017. Opinnäytetyö 1/2017. 119 sivua ja 4 liitettä. ISSN-2343-1741, ISBN 978-952-317-336-1.

Avainsanat: tietomalli, painumalaskenta, kokoonpuristuvuusindeksi, Monte Carlo -simulointi

Tiivistelmä

Nykykäytännöllä pehmeikölle maanvaraistesti perustettavien penkereiden painumalaskenta tehdään useimmiten käyttämällä laskentamallina penkereen ja maaperä-geometrian 2D-poikkileikkausta, jolloin kuormituksen ja geometrian oletetaan jatkuvan muuttumattomana poikkileikkausta vastaan kohtisuorassa suunnassa. Tämä voi vääristää todellista tilannetta erityisesti kohdissa, joissa penkereen poikkileikkaus-geometria muuttuu tai joissa maaperän rajapinnat ovat kaltevia penkereen pituussuunnassa. Lisäksi laskenta tehdään useimmiten käyttäen yksittäisiä maaparametreja, jolloin tuloksena saadaan yksittäisiä painumien arvoja. Maaparametreihin ja näin ollen laskennan tuloksiin liittyy kuitenkin aina epävarmuutta. Tuloksen luotettavuutta ei pystytä kvantitatiivisesti arvioimaan, kun laskenta tehdään yksittäisillä parametreilla.

Infra-alalla ollaan vahvasti siirtymässä kohti tietomallipohjaista suunnittelua, rakentamista ja ylläpitoa. Tietomallia ei kuitenkaan voida nykyisissä geoteknisen laskennan ohjelmistoissa suoraan hyödyntää laskentamallin muodostuksessa. Geoteknisen mitoituksen osalta palataan tietomallipohjaisissa hankkeissa näin ollen takaisin perinteiseen dokumenttipohjaiseen suunnitteluun, sillä suuri osa laskennasta ja mitoituksesta tehdään edelleen käyttäen poikkileikkauksia.

Tässä työssä toteutettiin MATLAB-koodina painumalaskentamoottori, joka käyttää lähtötietonaan tietomallin Inframodel-muodossa olevia suunniteltujen pengerrakenteiden sekä maaperän rajapintojen koordinaattitietoja. Työssä kehitetyn painumalaskentamoottorin laskentamalli muodostetaan täten poikkileikkauksen sijaan kolmiulotteisena suoraan tietomallista. Painumien laskennassa tarkastellaan kuitenkin vain pystysuuntaisia jännityksiä ja muodonmuutoksia.

Laskentamoottoriin implementoitiin lisäksi mahdollisuus painumien laskentaan Monte Carlo -simuloinnilla. Tällöin parametrit annetaan tilastollisina jakaumina, ja laskenta suoritetaan useaan otteeseen siten, että jokaisella laskennalla muodostetaan parametreiksi satunnaiset arvot annetuista jakaumista. Näin laskettaessa saadaan tuloksena painumien tilastollisia jakaumia, joista voidaan edelleen laskea tarvittavia todennäköisyyksiä ja tilastollisia tunnuslukuja.

Aatu Eteläsaari: Utnyttjande av datamodell vid sättningsberäkning för väg. Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2017. Lärdomsprov 1/2017. 119 sidor och 4 bilagor. ISSN-2343-1741, ISBN 978-952-317-336-1.

Sammanfattning

Med den nuvarande metoden utförs sättningsberäkningar för vägbankar som anläggs på mark i mjuk terräng oftast med användning av 2D-tvärsnittet av vägbankens och markgrundens geometri, varvid man antar att belastningen och geometrin fortsätter oförändrade i vinkelrät riktning mot tvärsnittet. Detta kan förvränga den verkliga situationen, i synnerhet i punkter där vägbankens tvärsnittsgeometri förändras eller då markgrundens gränssytor lutar i vägbankens längdriktning. Dessutom görs beräkningen oftast med användning av enskilda markparametrar, varvid man som resultat får enskilda sättningsvärden. Markparametrar, och följaktligen också beräkningsresultaten, är dock alltid förknippade med osäkerhet. Resultatets tillförlitlighet kan inte bedömas kvantitativt när beräkningen utförs med enskilda parametrar.

Inom infrabranschen sker en stark övergång mot planering, byggande och underhåll som baseras på datamodeller. I nuvarande programvaror för geoteknisk beräkning kan dock inte någon datamodell utnyttjas direkt för skapande av en beräkningsmodell. När det gäller geoteknisk dimensionering återgår man således till traditionell dokumentbaserad planering, eftersom en stor del av beräkningarna och dimensioneringen fortfarande utförs med användning av tvärsnitt.

I detta arbete implementerade man som MATLAB-kod en sjunkningsberäkningsmotor, vilken som sina utgångsdata använder koordinatdata för de planerade bankkonstruktionerna och markgrundens gränssytor. Dessa koordinatdata finns i datamodellens Inframodel-form. Den i arbetet använda sjunkningsberäkningsmotorns beräkningsmodell bildas således tredimensionell direkt ur datamodellen, i stället för ett tvärsnitt. Vid beräkning av sjunkning granskar man dock enbart vertikala spänningar och formförändringar.

I beräkningsmotorn implementerades också en möjlighet till sjunkningsberäkning genom Monte Carlo-simulering. Då ges parametrarna som statistiska fördelningar, och beräkningen utförs i flera omgångar så att vid varje beräkning bildas som parametrar slumpmässiga värden ur de givna fördelningarna. Vid beräkning på detta sätt får man som resultat sjunkningarnas statistiska fördelningar, ur vilka man vidare kan beräkna nödvändiga sannolikheter och statistiska indikatorer.

Aatu Eteläsaari: Utilizing Building Information Modeling in road settlement calculations. Finnish Transport Agency, Engineering and Environment Department. Helsinki 2017. Thesis 1/2017. 119 pages and 4 appendices. ISSN-2343-1741, ISBN 978-952-317-336-1.

Keywords: BIM, settlement calculation, compression index, Monte Carlo -simulation

Summary

Settlement calculations of embankments founded on soft soil are usually performed by using a cross-section of the embankment as a calculation model. In a cross-section model, it is assumed that the soil geometry and load conditions are constant along the length of the embankment (plane strain case). This assumption may distort the actual geometry, especially in cases where the cross-section of the embankment varies or where soil layers are slanted in the direction of the length of the embankment. In addition, the calculations are usually performed by using single values for soil parameters. This yields single results for calculated settlements. However, the soil parameters and therefore the results always include uncertainty. The reliability of the result cannot be quantitatively assessed when using only single values for soil parameters.

The infraconstruction industry in Finland trends strongly towards BIM-based design, construction and maintenance. However, existing geotechnical computation software cannot use BIM –models directly as a source of calculation geometry. Therefore, as far as geotechnical design is concerned, BIM-based projects are in large part carried out with a traditional document-based design process, as majority of the design calculations are performed with hard copies of cross-sections.

In this thesis, a MATLAB-code for a settlement calculation engine was developed. The calculation engine uses the coordinate information from the BIM-model as source of model geometry. Thus, instead of a cross-section, the calculation model for settlement calculations is formed three-dimensionally directly according to the BIM-model. However, only vertical stresses and deformations are considered in the calculation engine.

In addition, a Monte Carlo simulation for settlement calculation was implemented in the calculation engine. When Monte Carlo simulation is used in the engine, the soil parameters are given by statistical distributions. The calculation is then repeated several times by generating random parameters according to given distributions for each calculation. By using Monte Carlo simulation, a distribution of calculated settlements is obtained. The distribution may then be further utilized to calculate needed probabilities and statistical parameters.

Esipuhe

Infrasuunnittelussa lisääntyvässä määrin käytettävää tietomallinnusta ei vielä täysimääräisesti hyödynnetä geoteknisessä suunnittelussa. Erityisesti geoteknistä laskentaa varten tietomalleja ei voida suoraan hyödyntää laskentamallin muodostamisessa. Tässä tutkimuksessa kehitettiin Inframodel-muodossa suunniteltujen pengerakenteiden ja maaperän rajapintojen koordinaattitietoja hyödyntävä painumalaskentamoottori. Laskentamoottorilla saadaan laskettua penkereen painumat koko tarkasteltavalla alueella. Laskentamoottorin toiminta varmistettiin koelaskentojen lisäksi todellisessa kohteessa, Valtateiden 3 ja 18 parantaminen Laihian kohdalla, missä hankkeen suunnittelussa tuotetut pintamallit ja pohjatutkimustiedot käytettiin laskennan lähtöaineistona. Laskennalliset ja painumamittauksin todetut painumat vastasivat hyvin toisiaan.

Tämän tutkimuksen on tehnyt Aatu Eteläsaari diplomityönä Aalto-yliopistolle. Työ on tehty Sito Oy:ssä. Työn tilaajana ja rahoittajana oli Liikennevirasto.

Työtä ohjasi Juha Liukas Sito Oy:stä ja työtä valvoi professori Leena Korkiala-Tanttu Aalto-yliopistosta. Lisäksi työn ohjausryhmään kuuluivat Veli-Matti Uotinen Liikennevirastosta ja Mikko Suoranta Sito Oy:stä.

Helsingissä kesäkuussa 2017

Liikennevirasto

Tekniikka ja ympäristö -osasto sekä Projektien toteutus -osasto

Sisällysluettelo

LYHENTEET JA MERKINNÄT	9
1 JOHDANTO	12
1.1 Työn tausta	12
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus	14
1.3 Työn sisältö	14
2 MAANVARAISEN PENKEREEN PAINUMALASKENTA	16
2.1 Primaarisen konsolidaatiopainuman laskentamenetelmät	16
2.1.1 Yleistä	16
2.1.2 Tangenttimoduulimenetelmä	16
2.1.3 Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä	18
2.2 Jännityksen jakautuminen maapohjassa	25
2.2.1 Jännitys jakaumateoria	25
2.2.2 Kuivakuorikerroksen vaikutus jännitys jakaumaan	28
2.2.3 Nosteen aiheuttama jännityksen muutos	32
2.3 3D painumalaskennassa	32
3 TIETOMALLI PAINUMALASKENNAN LÄHTÖTIETONA	36
3.1 Yleistä	36
3.2 Inframodel-formaatti	36
3.3 Tietomalliin liittyvä epätarkkuus	38
3.4 Mallin laadunvarmistus painumalaskentaa varten	42
4 TIETOMALLIA HYÖDYNTÄVÄ PAINUMALASKENTAMOOTTORI	43
4.1 Laskennan oletukset ja rajoitukset	43
4.2 Laskentamoottorin toimintaperiaate	44
4.2.1 Lähtötiedot	44
4.2.2 Laskentapistematriisit	45
4.2.3 Vallitseva jännitys	47
4.2.4 Kuormamatriisit ja pengerkuorman diskretointi	48
4.2.5 Jännityslisäysten laskenta	50
4.2.6 Painumien laskenta	51
4.2.7 Monte Carlo –simulointi	52
4.3 Laskentamoottorin validointi	53
4.3.1 Yleistä	53
4.3.2 Testilaskenta 1: vaakasuorat pinnat	54
4.3.3 Testilaskenta 2: kaivupinta	60
4.3.4 Testilaskenta 3: kaltevat pinnat ja oja	65
4.3.5 Testilaskenta 4: kevennysrakenne	70
5 KOELASKENTA TIETOMALLILLA	75
5.1 Koelaskentakohde Vt ₃ /Vt ₁₈ Laihia	75
5.2 Kohteen maaparametrit	78
5.3 Parametrien hajonta	83
5.4 Koelaskennan tulokset	85
5.4.1 Deterministinen laskenta	85
5.4.2 Tilastollinen laskenta Monte Carlo –simuloinnilla	95
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	111

7	KEHITYSEHDOTUKSET	114
---	-------------------------	-----

LÄHTEET	116
---------------	-----

LIITTEET

Liite 1	PINTAPAINUMA-laskentamoottorin MATLAB-koodi ja deterministisen laskennan maaparametrifunktiot
Liite 2	PINTAPAINUMA-laskentamoottorin maaparametrifunktiot Monte Carlo -simuloinnissa
Liite 3	Laskentamoottorin validoinnissa käytettyjen pintatiedostojen sisältö
Liite 4	Deterministisen koelaskennan laskentatulosteet

Lyhenteet ja merkinnät

Latinalaiset kirjaimet

b	pistekuormien vaakasuuntainen etäisyys
c	koheesio
C_c	normaalikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksi
C_r	ylikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksi
c_v	pystysuuntainen konsolidaatiokerroin
COV	variaatiokerroin (coefficient of variation)
dz	laskentapisteidien pystysuuntainen etäisyys
E	kimmomoduuli
E_1	kuivakuorikerroksen kimmomoduuli
E_2	saven kimmomoduuli
e	huokosluku
e_o	maakerroksen luonnotilainen huokosluku
H	painuvan kerroksen paksuus; suotomatka
h	kerrospaksuus
h_e	kuivakuorikerroksen muunnettu paksuus
K_o	lepopainekerroin
k	laskentapisteidien lukumäärä z-akselin suunnassa
k_c	vesipitoisuusmenetelmän kerroin
M_{NK}	normaalikonsolidoituneen osan tangenttimoduuli
M_{YK}	ylikonsolidoituneen osan tangenttimoduuli
m	moduuliluku (luvut 2 ja 5)
m	laskentapisteidien lukumäärä x-akselin suunnassa (kappale 4.2.2)
m	pistekuormien lukumäärä x-akselin suunnassa (kappale 4.2.5)
m_1	normaalikonsolidoituneen osan moduuliluku
m_2	ylikonsolidoituneen osan moduuliluku
m_{koe}	ödometrikokeesta määritetty moduuliluku
m_{lask}	laskennassa käytetty moduuliluku
n	osakerrosten lukumäärä (luku 2)
n	laskentapisteidien lukumäärä y-akselin suunnassa (kappale 4.2.5)
n	kuormainkrementtien lukumäärä (kappaleet 4.2.4 ja 4.3.5)
n	pistekuormien lukumäärä y-akselin suunnassa (kappale 4.2.5)
n	simulointikertojen lukumäärä (kappale 4.2.7, luku 5)
p'	hydrostaattinen jännitys
p_p	isotrooppinen esikonsolidaatiojännitys
Q	pistekuorma
Δq	kuorman muutos
q	deviatorinen jännitys
S	primaarinen konsolidaatiopainuma
S_i	osakerroksen i primaarinen konsolidaatiopainuma
SD_x	satunnaismuuttujan otoskeskihajonta
s_u	suljettu leikkauslujuus
w	vesipitoisuus
\bar{x}	satunnaismuuttujan otoskeskiarvo
z	syvyys; z-koordinaatti; kaivupinnan z-koordinaatti
z'	muunnettu syvyys
z_1	penkereen yläpinnan z-koordinaatti
z_2	maanpinnan z-koordinaatti

Z_4	kuivakuoren alapinnan z-koordinaatti
Z_{14}	kevennysrakenteen yläpinnan z-koordinaatti

Kreikkalaiset kirjaimet

$d\varepsilon$	pystymuodonmuutosinkrementti
ε_{NK}	normaalikonsolidoituneen osan pystymuodonmuutos
ε_{NK}	ylikonsolidoituneen osan pystymuodonmuutos
κ	MCC-mallin paisumisindeksi (Swelling Index)
κ^*	SS-mallin muunnettu paisumisindeksi (Swelling Index)
λ	MCC-mallin kokoonpuristuvuusindeksi
λ^*	SS-mallin muunnettu kokoonpuristuvuusindeksi
μ_x	satunnaismuuttujan odotusarvo
μ_{ln}	log-normaalijakauman lokaatioparametri
ν	Poissonin luku; ominaistilavuus; varianssi
$d\sigma'$	tehokas pystyjännityslisäysinkrementti
σ'	tehokas pystyjännitys
σ'_0	tehokas vallitseva pystyjännitys
σ_c oedo	moduuliluvun sidontaan käytetty esikonsolidaatiojännitys
σ'_h	tehokas vaakajännitys
σ'_p	esikonsolidaatiojännitys
σ'_p koe	ödometrikokeesta määritetty esikonsolidaatiojännitys
σ'_p lask	laskennassa käytetty esikonsolidaatiojännitys
σ'_v	tehokas pystyjännitys
σ_{ln}	log-normaalijakauman skaalaparametri
σ_v	vertailujännitys 100 kPa
σ_x	satunnaismuuttujan keskihajonta
$\Delta\sigma$	jännityksen muutos; jännityslisäys
$\Delta\sigma_z$	kuorman aiheuttama pystyjännityslisäys
φ	kitkakulma

Matriisimerkinnät

D	materiaalimallimatriisi
P_1	penekereen yläpinnan z-koordinaattimatriisi
P_2	maanpinnan z-koordinaattimatriisi
P_3	kaivupinnan z-koordinaattimatriisi
P_4	kuivakuoren alapinnan z-koordinaattimatriisi
P_5	saven alapinnan z-koordinaattimatriisi
P_6	vallitsevan tehokkaan jännityksen matriisi
P_7	ylikonsolidaatiomatriisi
P_8	jännityslisäysmatriisi
P_9	normaalikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksin matriisi
P_{10}	luonnontilaisen huokosluvun matriisi
P_{11}	ylikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksin matriisi
P_{12}	esikonsolidaatiojännitysmatriisi
P_{13}	tehokkaan jännityksen matriisi
P_{14}	kevennysrakenteen yläpinnan z-koordinaattimatriisi
Q_1	penekereen yläpinnan z-koordinaattimatriisi
Q_2	maanpinnan z-koordinaattimatriisi
Q_4	kuivakuoren alapinnan z-koordinaattimatriisi
Q_5	saven alapinnan z-koordinaattimatriisi

Q_{14}	kevennyksen yläpinnan z-koordinaattimatriisi
Q_z	kuorman vaikutuspisteiden z-koordinaattimatriisi
Q_q	kuormamatriisi
S	painumamatriisi
S_i	yhden simulaatiokerran painumamatriisi
x	laskentapisteiden x-koordinaattivektori
y	laskentapisteiden y-koordinaattivektori
z	laskentapisteiden z-koordinaattivektori
$\Delta \epsilon$	muodonmuutosvektori
$\Delta \sigma$	jännitysvektori

Lyhenteet

CRS	jatkuvapuristeinen ödometrikoe (constant rate of strain oedometer test)
FEM	elementtimenetelmä (finite element method)
GeoCalc	GeoCalc 3.2 laskentaohjelmisto
MATLAB	numeerisen laskennan ohjelmisto ja siinä käytettävä ohjelmointikieli (Matrix Laboratory)
MC	Mohr-Coulomb, FEM-laskennassa käytettävä materiaaalimalli
MCC	Modified Cam-Clay, FEM-laskennassa käytettävä materiaaalimalli
OCR	ylikonsolidaatioaste (overconsolidation ratio)
POP	ylikonsolidaatio (pre-overburden pressure)
PP	työssä kehitetty PINTAPAINUMA –painumalaskentamoottori
SETTLE	GeoCalc 3.2 painumalaskentaohjelmassa käytetty laskentamoottori
SS	Soft Soil, FEM-laskennassa käytettävä materiaaalimalli

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Pehmeikölle maanvaraisesti perustettujen tie- ja ratapenkereiden painumien ennustaminen luotettavasti on haastava tehtävä. Painumien laskentaan liittyy useita epävarmuustekijöitä, joiden kumulatiivisesta vaikutuksesta toteutuneet painumat ja painumaerot voivat poiketa laskelmin ennustetuista painumista huomattavasti. Epätarkkuutta painumalaskentaan tuovat maakerrosten geometriatiedon epätarkkuus, maan painumaominaisuuksien epävarmuus ja vaihtelu sekä laskentamalleihin liittyvät yksinkertaistukset.

Nykyään vallalla olevan käytännön mukaisesti maanvaraisen penkereen painumalaskenta suoritetaan 2D-laskentana poikkileikkauksittain, ja tien pituussuuntaisia painumaeroja tarkastellaan usein yksittäisestä pituusleikkauksesta lasketuista painumista tai vertaamalla kahdesta tai useammasta lähekkäin olevasta poikkileikkauksesta laskettuja painumia. Tällä tavoin leikkauksittain laskettaessa mallissa oletetaan, että kyseisen leikkauksen maakerrosten geometria ja kuormitusolosuhteet jatkuvat äärettömästi leikkaustasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa, mikä voi vääristää todellista tilannetta. Ongelma korostuu esimerkiksi tilanteissa, joissa tien poikkileikkausgeometria muuttuu tien levennysten ja erkanevien ramppien vuoksi tai tilanteissa, joissa maakerrosrajat ovat hyvin kaltevia. Kaikki tilanteet, joista käytännön painumalaskentaa tehdään, ovat todellisuudessa kolmiulotteisia.

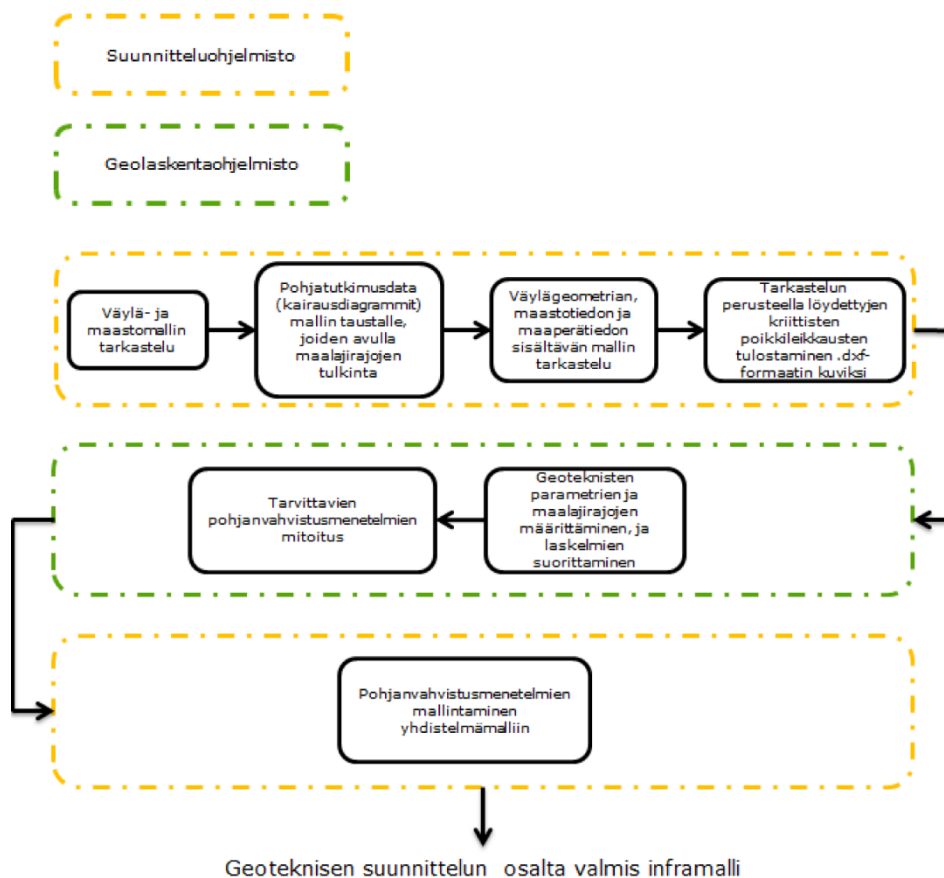
Kolmiulotteisen tilanteen 2D-redusoinnin lisäksi laskentamalleissa tehdään yleensä yksinkertaistus, jossa painuville maakerroksille annetaan yksiarvoisia painumaparametreja. Tällöin laskentamallissa oletetaan, että painumaparametrit maakerroksen sisällä ovat vakioita. Useissa tutkimuksissa (mm. Phoon ja Kulhawy 1999; Akbas ja Kulhawy 2010; Löfman 2016) on kuitenkin havaittu, että parametrien vaihtelu painuvassa kerroksessa on lyhyelläkin tarkastelualueella merkittävää.

Laskentamallin 2D-yksinkertaistuksesta sekä parametrien vaihtelusta aiheutuvaa painumalaskennan epätarkkuutta voidaan mahdollisesti pienentää mallintamalla kuormitustilanteet sekä maakerrosten geometria kolmiulotteisena ja maaparametrien vaihtelu esimerkiksi tilastollisia jakaumia käyttäen. Työkaluja tämän tyyppisten kolmiulotteisten laskentamallien luomiseen ei kuitenkaan vielä ole juuri kehitetty.

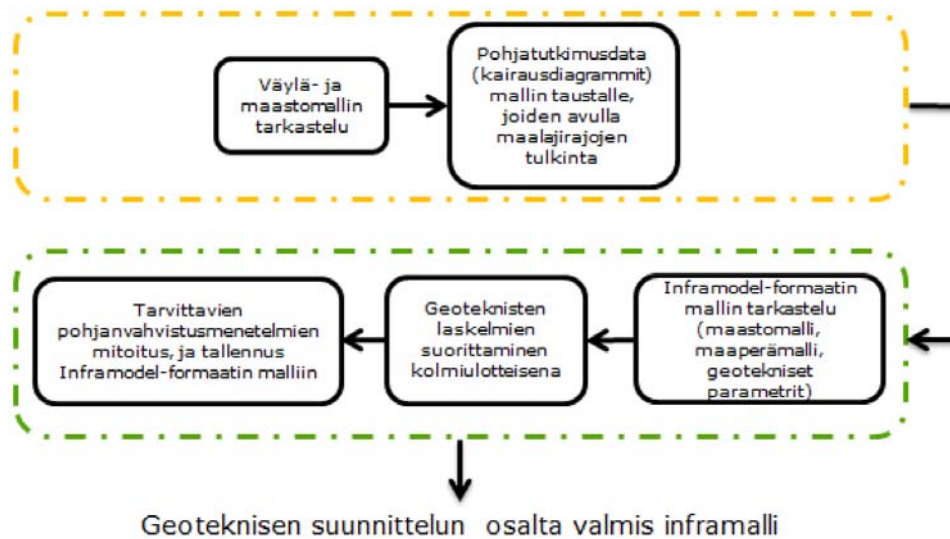
Infra-alan digitalisaation myötä infrarakentamisessa ollaan vahvasti siirtymässä dokumenttipohjaisesta suunnittelusta tietomallintamiseen. Tietomallintamista tukevat geoteknisen suunnittelun ja mitoituksen työkalut ovat kuitenkin vielä puutteellisia, ja käytännössä esimerkiksi tiepenkereiden painumamitoitus tehdään edelleen perinteisillä 2D-painumalaskelmilla myös tietomallipohjaisissa hankkeissa. Vaikka nykyään laajassa käytössä olevissa geoteknisissä laskentaohjelmistoissa (esim. Novapoint GeoCalc, PLAXIS) on saatavilla myös 3D-laskentaominaisuuksia, eivät ne tällä hetkellä tue Infra-alan tietomallinnuksessa Suomessa käytettävää Inframodel-tiedonsiirtoformaattia. Näin ollen tietomallista ei suoraan voida muodostaa laskentaohjelmistossa käytettävää laskentamallia, eikä laskennan tuloksia voida helposti esittää ja havainnollistaa tietomallin avulla. Lisäksi vain harvoissa geoteknisissä laskentaohjelmistoissa on ominaisuuksia maaparametrien hajonnan mallintamiseen.

Koska geoteknisen laskennan tietokoneohjelmistot eivät nykyisellään tue tietomalleissa käytettävää Inframodel-tiedonsiirtoformaattia, joudutaan tietomallista tuottamaan erillisiä esimerkiksi .dxf-formaatissa olevia poikkileikkauksia, jotka vasta jatkokäsittelyn jälkeen voidaan siirtää laskentaohjelmistoon. Joissakin laskentaohjelmistoissa laskentamalli joudutaan tuottamaan kokonaan erillisenä. Tietomallipohjaisissa hankkeissa palataan täten geoteknisen mitoituksen osalta dokumenttipohjaiseen 2D-suunnitteluun, eikä geoteknisissä mitoituslaskelmissa hyödynnetä täysin tietomallin kolmiulotteista luonnetta.

Ideaalitilanteessa tietomalli siirrettäisiin sellaisenaan suunnitteluohjelmistosta laskentaohjelmistoon, ja laskennan tuloksia voitaisiin tarkastella tietomallin avulla. Tämän jälkeen malliin voitaisiin tarvittaessa tehdä muutoksia. Alla on esitetty tietomallipohjaisten infrahankkeiden geoteknisen suunnittelun prosessi nykykäytännöllä (Kuva 1) ja ideaalitilanteessa (Kuva 2). (Brotherus 2014).



Kuva 1. Geoteknisen suunnittelun prosessi tietomallipohjaisissa infrahankkeissa nykykäytännöllä. (Brotherus 2014)



Kuva 2. Geoteknisen suunnittelun prosessi tietomallipohjaisissa infrahankkeissa ideaalitulanteessa. (Brotherus 2014)

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena oli kehittää tietomallia hyödyntävä tie- ja ratapenkereiden painumalaskentamenetelmä, jossa voidaan käyttää tietomallin Inframodel-formaatissa olevaa tietoa laskennan lähtötietona. Tavoitteena oli myös, että painumalaskennan tuloksia voidaan havainnollistaa tietomallin avulla. Lisäksi työssä tutkittiin mahdollisuutta maaparametrien paikallisen vaihtelun mallintamiseen painumalaskennassa. Työssä tehtiin koelaskentaa Vt3/Vt18 Laihia -hankkeen esikuormituspenkereistä ja tutkittiin tietomallia hyödyntävän painumalaskennan hyötyjä suhteessa perinteiseen 2D-poikkileikkauslaskentaan. Koelaskennan tuloksia verrattiin kohteesta mitattuihin toteutuneisiin painumiin.

Tietomallia hyödyntävä painumalaskentamoottori toteutettiin MATLAB-koodina käyttäen kokoonpuristuvuusindeksimenetelmää. Aika-painuman tarkastelu rajattiin työstä pois, ja laskennoissa tarkasteltiin vain primaarisen konsolidaatiopainuman loppuarvoja. Myös alku- ja sekundaaripainuman sekä leikkausjännitysten aiheuttaman painuman tarkastelu rajattiin työstä pois.

1.3 Työn sisältö

Luvussa 2 esitellään maanvaraisten penkereiden painumalaskennan teoreettinen tausta, jonka pohjalta tietomallia hyödyntävä laskentamenetelmä kehitettiin. Luvussa 2 paneudutaan perusteorioiden lisäksi seikkoihin, jotka vaikuttavat oleellisesti painumalaskennan tarkkuuteen.

Luvussa 3 tarkastellaan tietomallin soveltuvuutta painumalaskennan lähtötiedoksi. Erityisesti käsitellään tietomallin sisältämän informaation tarkkuustasoa ja epävarmuustekijöitä.

Luvussa 4 esitellään työssä kehitetyn tietomallia hyödyntävän painumalaskentamoottorin toimintaperiaate. Tässä luvussa esitetään matemaattisesti, kuinka laskentamoottori on toteutettu sekä laskennassa tehtävät oletukset ja rajoitukset. Lisäksi luvussa 4 esitetään laskentamoottorilla laskettujen tulosten validointi testi- ja vertailulaskelmin.

Luvussa 5 tehdään koelaskentaa V_{t3}/V_{t18} Laihia -hankkeessa rakennetusta esikuormituspenkereestä. Laskennan tuloksia verrataan perinteiseen 2D-laskentaan sekä toteutuneisiin painumiin.

2 Maanvaraisen penkereen painumalaskenta

2.1 Primaarisen konsolidaatiopainuman laskentamenetelmät

2.1.1 Yleistä

Pehmeiden maakerrosten primaarisen konsolidaatiopainuman laskentaan on vuosien saatossa kehitetty lukuisia menetelmiä. Tässä työssä käsitellään kahta klassiseen maamekaniikkaan pohjautuvaa analyyttistä painumalaskentamenetelmää: tangenttimoduulimenetelmää (Janbu 1967) sekä kokoonpuristuvuusindeksimenetelmää (mm. Terzaghi ja Peck 1948). Tietomallia hyödyntävä painumalaskentamoottori toteutettiin käyttämään kokoonpuristuvuusindeksimenetelmää. Vertailevaa perinteistä poikkeileikkauslaskentaa suoritettiin tangenttimoduulimenetelmällä. Laskentatuloksia verrattiin myös elementtimenetelmällä (FEM) laskettuihin tuloksiin.

2.1.2 Tangenttimoduulimenetelmä

Maanvaraisten penkereiden primaarisen konsolidaatiopainuman laskennassa käytetään Suomessa useimmiten tangenttimoduulimenetelmää. Menetelmä tunnetaan myös nimellä Ohde-Janbu-menetelmä. Tangenttimoduulimenetelmässä maan kokoonpuristuvuusmoduuli määritellään empiirisillä yhtälöillä (1) (Vepsäläinen ja Takala 2004).

$$M_{NK} = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} = m_1 \sigma_v \left(\frac{\sigma'}{\sigma_v} \right)^{1-\beta_1} \quad \text{kun } \sigma' > \sigma'_p \quad (1a)$$

$$M_{YK} = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} = m_2 \sigma_v \left(\frac{\sigma'}{\sigma_v} \right)^{1-\beta_2} \quad \text{kun } \sigma'_0 < \sigma' \leq \sigma'_p \quad (1b)$$

Missä	M_{NK}	on normaalikonsolidoituneen osan tangenttimoduuli [kPa]
	M_{YK}	on ylikonsolidoituneen osan tangenttimoduuli [kPa]
	$d\sigma'$	on pystyjännityslisäysinkrementti [kPa]
	$d\varepsilon$	on pystysuuntainen muodonmuutosinkrementti [%]
	m_1	on normaalikonsolidoituneen osan moduuliluku [-]
	β_1	on normaalikonsolidoituneen osan jännityseksponentti [-]
	m_2	on ylikonsolidoituneen osan moduuliluku [-]
	β_2	on ylikonsolidoituneen osan jännityseksponentti [-]
	σ'	on tehokas pystyjännitys kuormituksen alaisena [kPa]
	σ_v	on vertailujännitys, 100 kPa
	σ'_p	on tehokas esikonsolidaatiojännitys [kPa]
	σ'_0	on tehokas vallitseva pystyjännitys [kPa]

Yhtälöistä (1) saadaan painuvan kerroksen pystymuodonmuutoksille yhtälöt (2).

$$\varepsilon_{NK} = \int_{\sigma'_p}^{\sigma'} \frac{d\sigma'}{M} = \frac{1}{m_1 \beta_1} \left[\left(\frac{\sigma'}{\sigma_v} \right)^{\beta_1} - \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma_v} \right)^{\beta_1} \right] \quad \text{kun } \sigma' > \sigma'_p \wedge \beta_1 \neq 0 \quad (2a)$$

$$\varepsilon_{NK} = \frac{1}{m_1} \ln \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_p} \right) \quad \text{kun } \sigma' > \sigma'_p \wedge \beta_1 = 0 \quad (2b)$$

$$\varepsilon_{YK} = \int_{\sigma'_0}^{\sigma'} \frac{d\sigma'}{M} = \frac{1}{m_2 \beta_2} \left[\left(\frac{\sigma'}{\sigma_v} \right)^{\beta_2} - \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_v} \right)^{\beta_2} \right] \quad \text{kun } \sigma' \leq \sigma'_p \wedge \beta_2 \neq 0 \quad (2c)$$

$$\varepsilon_{YK} = \frac{1}{m_2} \ln \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad \text{kun } \sigma' \leq \sigma'_p \wedge \beta_2 = 0 \quad (2d)$$

missä

ε_{NK} on normaalikonsolidoituneen osan pystymuodonmuutos [%]

ε_{YK} on ylikonsolidoituneen osan pystymuodonmuutos [%]

Kerroksen primaarinen konsolidaatiopainuma lasketaan normaali- ja ylikonsolidoituneelle osalle erikseen yhtälöiden (3) mukaisesti.

$$S = \varepsilon_{YK} H \quad \text{kun } \sigma'_0 < \sigma' \leq \sigma'_p \quad (3a)$$

$$S = (\varepsilon_{YK} + \varepsilon_{NK}) H \quad \text{kun } \sigma'_0 < \sigma'_p < \sigma' \quad (3b)$$

$$S = \varepsilon_{NK} H \quad \text{kun } \sigma'_0 = \sigma'_p < \sigma' \quad (3c)$$

missä S on kerroksen painuma [m]

H on kerroksen paksuus [m]

Usein laskennan tarkentamiseksi painuva maakerros jaetaan n kpl osakerroksiksi, joille jokaiselle lasketaan painuma yhtälöillä (2) ja (3). Koko kerroksen painuma saadaan summaamalla osakerrosten painumat yhteen, yhtälö (4).

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (4)$$

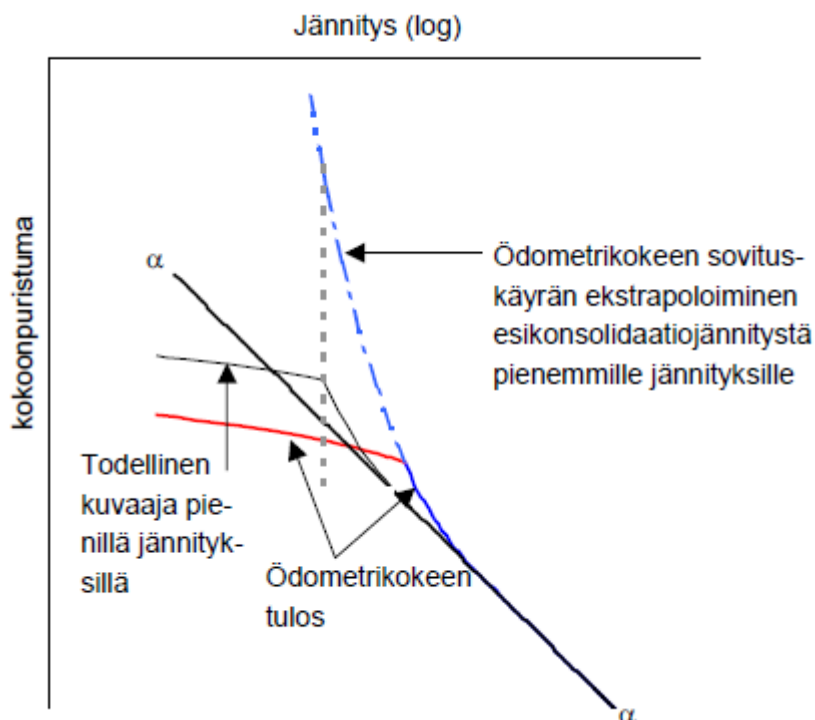
missä S on koko kerroksen painuma [m]

S_i on osakerroksen i painuma [m]

Kuten yhtälöistä (2) havaitaan, kuvataan tangenttimoduulimenetelmässä maakerroksen jännitys-muodonmuutuskäyttäytymistä kuormituksen alaisena viidellä maaparametrilla: m_1 , β_1 , m_2 , β_2 ja σ'_p . Mikäli maan oletetaan olevan normaalisti konsolidoitunutta, eli $\sigma'_0 = \sigma'_p$, lasketaan muodonmuutokset yhtälöillä (2a ja b), ja maaparametreista tarvitaan ainoastaan normaalikonsolidoituneen osan parametrit m_1 ja β_1 .

Tangenttimoduulimenetelmän laaja käyttö Suomessa perustuu siihen, että menetelmässä voidaan hyvin mallintaa suomalaisille saviille tyypillinen esikonsolidaatiojännityksen ylittymistä seuraava ”romahtaminen”. Tämä tehdään käyttämällä jännityks eksponentille β_1 negatiivista arvoa. (Länsivaara 2000, s. 7–9).

Moduuliluku m , jännityseksponentti β ja esikonsolidaatiojännitys σ'_p määritetään ödometrikokeen jännitys-muodonmuutoskuvaajasta. Tangenttimoduulimenetelmää käytettäessä on huomioitava, ettei kokeesta määritetä painumalaskennassa suoraanaisesti käytettäväksi parametriksi kokoonpuristuvuusmoduulia, vaan parametrit m ja β , jotka ovat jännitys-muodonmuutosriippuvuuden käyränsovituspärametreja. Näihin käyränsovituspärametreihin liittyy olennaisesti se jännitysväli, jolta ne on määritetty. Mikäli pärametreja käytetään laskennassa pienemmillä jännityksillä kuin miltä ne on määritetty, voivat lasketut painumat olla täysin virheellisiä eikä laskennallinen jännitys-muodonmuutoskuvaaja noudata enää lainkaan ödometrikokeen tulosta. Virheellistä pärametrien käyttöä on havainnollistettu alla olevassa kuvassa (Kuva 3). (Länsivaara 2000).



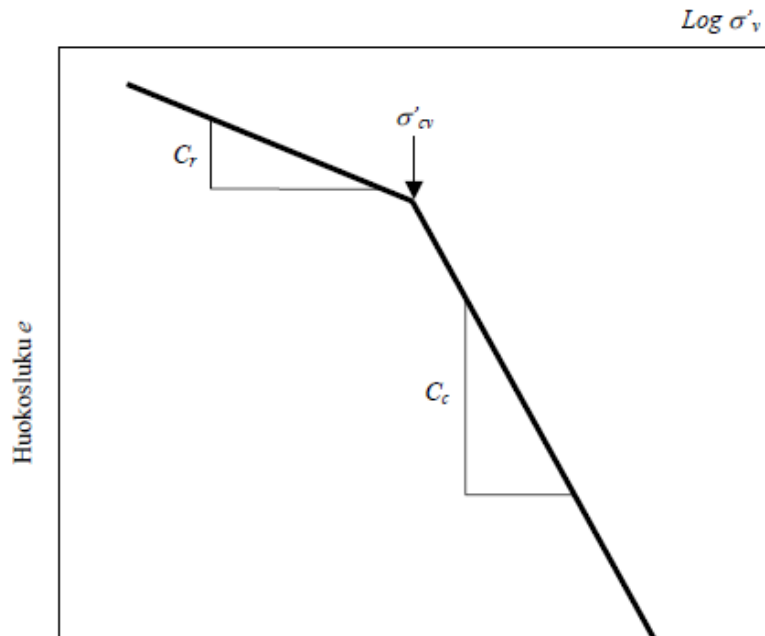
Kuva 3. Virheellinen jännitys-muodonmuutoskuvaaja käytettäessä ödometrikokeesta määritettyjä pärametreja pienemmillä jännityksillä kuin mistä ne on määritetty. (Länsivaara 2000, s. 21)

Tangenttimoduulimenetelmän muodonmuutosten yhtälöissä (2) käytettävien pärametrien luonteesta johtuen menetelmä on altis virheille, mikä korostuu erityisesti suurilla negatiivisilla jännityseksponentin β arvoilla. Tangenttimoduulimenetelmää käytettäessä onkin kiinnitettävä erityistä huomiota esikonsolidaatiojännityksen σ'_p oikeaan tulkintaan sekä pärametrien käyttöön siten, että laskennassa käytetty jännitys-muodonmuutoskuvaaja vastaa ödometrikokeen tulosta mahdollisimman hyvin. (Länsivaara 2000).

2.1.3 Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä

Kokoonpuristuvuusindeksi C_c on kansainvälisesti luultavasti käytetyin savikerrosten painumaominaisuuksien pärametri. Tangenttimoduulimenetelmästä poiketen kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän pärametrit määritetään ödometrikokeen jännitys-muodonmuutoskuvaajan sijaan kokeen jännitys-huokoslukukuvaajasta.

Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä perustuu olettamukseen, jonka mukaan huokosluvun ja logaritmiseen mittakaavaan piirretyn tehokkaan jännityksen välillä vallitsee normaalikonsolidoituneella alueella likipitään lineaarinen riippuvuus (Terzaghi ja Peck 1948, s. 61–64). Tämä vastaa tangenttimoduulimenetelmän tapausta, jossa jännityksen eksponentti $\beta=0$. Kuvassa 4 on esitetty kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän idealisoitu puolilogaritmisen jännitys-huokoslukukuvaaja.



Kuva 4. Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmässä käytettävä maan jännitys-huokoslukukuvaaja (Länsivaara 2000, s. 37).

Kerroksen pystymuodonmuutos lasketaan kokoonpuristuvuusindeksimenetelmässä erikseen normaali- ja ylikonsolidoituneella osalla yhtälöillä (5) (Korhonen et al. 1993, s. 41–42).

$$\varepsilon_{NK} = \frac{C_c}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_p}\right) \quad \text{kun } \sigma' > \sigma'_p \quad (5a)$$

$$\varepsilon_{YK} = \frac{C_r}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0}\right) \quad \text{kun } \sigma' \leq \sigma'_p \quad (5b)$$

missä

C_c	on normaalikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksi [-]
C_r	on ylikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksi [-]
e_0	on maakerroksen luonnontilainen huokosluku [-]

Kerroksen primaarinen konsolidaatiopainuma lasketaan edelleen yhtälöillä (3) ja (4).

Kokoonpuristuvuusindeksin kansainvälisesti laaja käyttö perustuu siihen, että menetelmän yhtälöt ovat suhteellisen yksinkertaisia ja kuvaavat kohtalaisen jäykän saven jännitys-muodonmuutostähtäytymistä hyvin. Suomalaisten savien käyttäytymistä kokoonpuristuvuusindeksi ei kuitenkaan aina kuvaa riittävällä tarkkuudella. Kokoonpuristuvuusindeksi soveltuu huonosti, jos savella on havaittavissa esikonsolidaatiojännityksen ylittymistä välittömästi seuraava ”romahtaminen” eli ödometrikokeesta määritetty tangenttimoduulimenetelmän jännityksen eksponentti β on vahvasti negatiivinen.

Kokoonpuristuvuusindeksi kuvaa saven jännitys-muodonmuutoskäyttäytymistä sitä paremmin, mitä lähempänä tangenttimoduulimenetelmän jännityseksponentti β on nollaa. Seuraavassa on esitetty esimerkkilaskelmin kokoonpuristuvuusindeksimenetelmällä laskettujen painumien virheen suuruus verrattuna tangenttimoduulimenetelmään, kun jännityseksponentti $\beta=-1$, kun $\beta=-0,5$ ja kun $\beta=-0,2$. Muut maaparametrit on valittu edustamaan luvussa 5 esitellyn koelaskentakohteen Vt3/Vt18 Laihia -hankkeen saven parametreja, ja ne on laskelmissa pidetty vakioina.

Esimerkkilaskelmissa on tarkasteltu 10 m leveän ja 1 m korkean penkereen aiheuttamia avoimen tilan painumia 5 m paksussa savikerroksessa. Esimerkkilaskelmissa ei ole huomioitu mahdollista ylikonsolidaatiota, vaan savi on laskelmissa mallinnettu normaalisti konsolidoituneena. Laskelmat on suoritettu GeoCalc 3.2 (jatkossa GeoCalc) ohjelmalla.

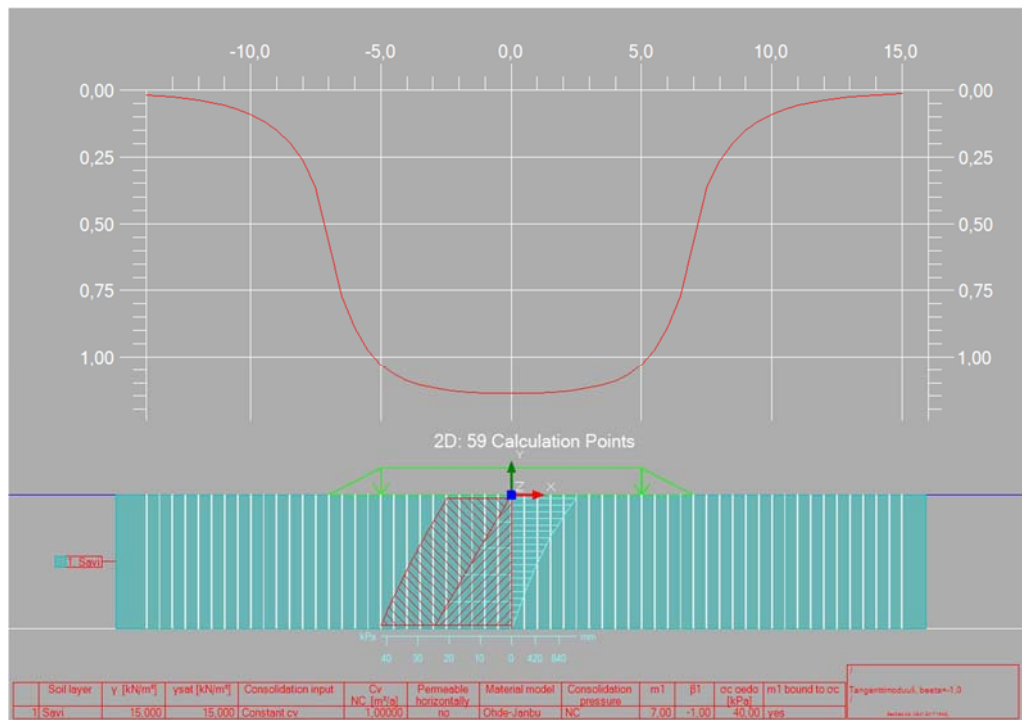
Painumalaskelmat tangenttimoduulimenetelmällä jännityseksponentilla $\beta=-1$, $\beta=-0,5$ ja $\beta=-0,2$ on esitetty *Kuvissa 5, 6 ja 7*. *Kuvassa 8* on kokoonpuristuvuusindeksimenetelmällä tehty laskelma, jossa maaparametrit vastaavat tangenttimoduulimenetelmän parametreja jännityseksponentilla $\beta=0$. Kokoonpuristuvuusindeksi on laskettu tangenttimoduulimenetelmän moduuliluvun m ja kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän parametrien välisestä yhteydestä (6) (Janbu 1970, s. 187).

$$C_c = \frac{1+e_0}{m} \ln 10 \quad (6)$$

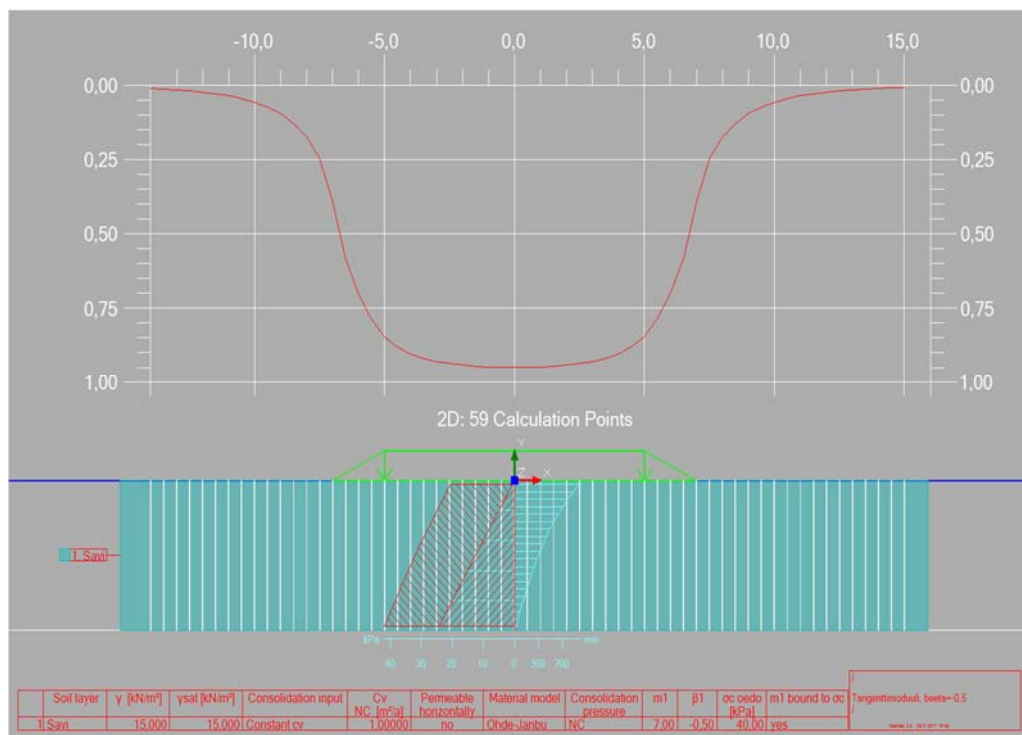
missä

C_c	on normaalikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksi [-]
m	on tangenttimoduulimenetelmän moduuliluku [-]
e_0	on maakerroksen luonnontilainen huokosluku [-]

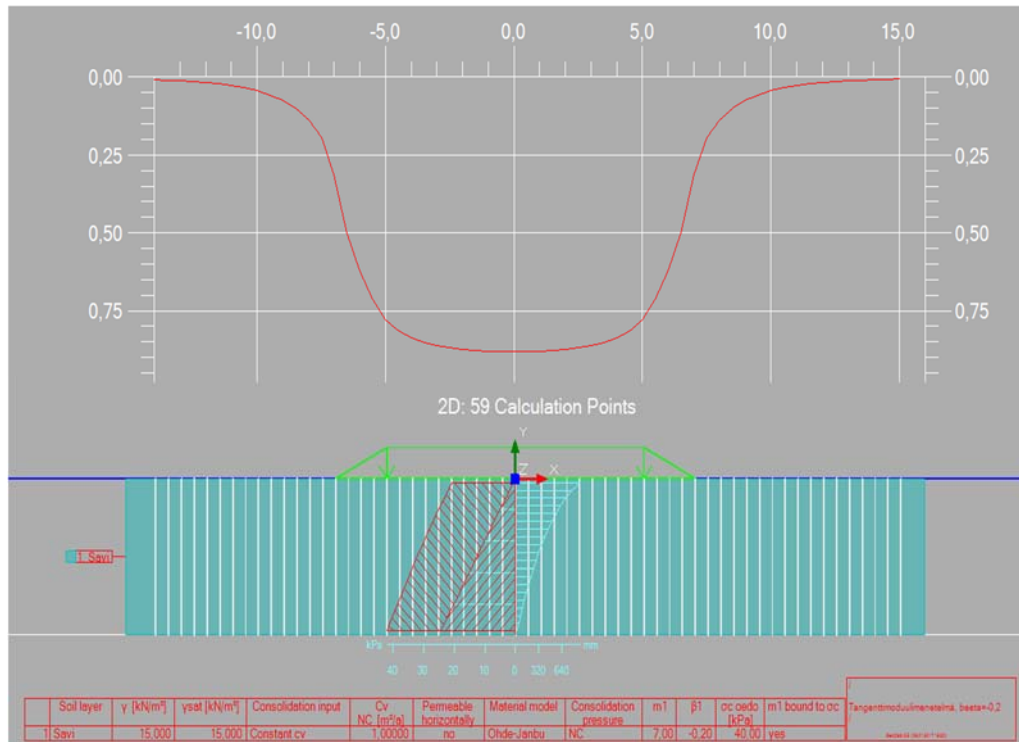
Huokoslukuksi esimerkkilaskelmaan määritettiin $e_0=2,0$, mikä vastaa likimäärin koelaskentakohteen savesta vesipitoisuuksien perusteella laskettujen huokoslukujen keskiarvoa.



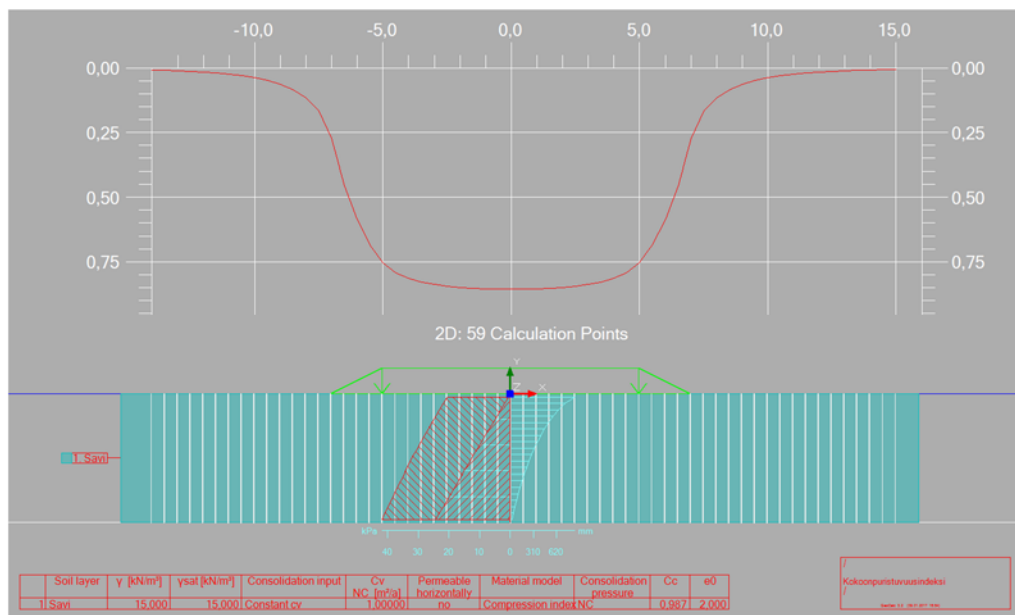
Kuva 5. Esimerkkilaskelma tangenttimoduulimenetelmällä, $\beta=-1$.



Kuva 6. Esimerkkilaskelma tangenttimoduulimenetelmällä, $\beta=-0,5$.



Kuva 7. Esimerkkilaskelma tangenttimoduulimenetelmällä, $\beta=-0,2$



Kuva 8. Esimerkkilaskelma kokoonpuristuvuusindeksimenetelmällä, vastaa tangenttimoduulimenetelmää jännityseksponentilla $\beta=0$.

Esimerkkilaskelmien parametrit ja maksimipainumat on esitetty Taulukossa 1. Laskelmista ja Taulukosta 1 havaitaan, että jännityseksponentilla $\beta=-1$ kokoonpuristuvuusindeksimenetelmällä laskettu painuma on noin 25 % pienempi kuin tangenttimoduulimenetelmällä laskettu. Jännityseksponentilla $\beta=-0,5$ tämä ero pienenee noin 10 %: iin ja jännityseksponentilla $\beta=-0,2$ ero on enää noin 3 %.

Taulukko 1. Esimerkkilaskelmien maksimipainumat.

Tangenttimoduulimenetelmä

m	β	σ_c oedo [kPa]	maks. painuma [m]
7	-1	40	1,14
7	-0,5	40	0,949
7	-0,2	40	0,881

Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä

Cc	e _o	maks. painuma [m]
0,987	2	0,857

On hyvä huomioida, että tangenttimoduulimenetelmän laskelmissa moduuliluku on sidottu ödometrikokeen esikonsolidaatiojännitykseen (σ_c oedo), joka on laskelmissa 40 kPa. Tällöin laskentaohjelma muuntaa moduuliluvun m vastaamaan jännitystasoa kullakin laskentasyvyydellä kaavalla (7) (Vepsäläinen ja Takala 2004; Länsivaara 2000).

$$m_{lask} = m_{koe} \left(\frac{\sigma'_{p\ koe}}{\sigma'_{p\ lask}} \right)^{-\beta} \quad (7)$$

missä

m_{lask}	on laskennassa käytetty moduuliluku [-]
m_{koe}	on ödometrikokeesta määritetty moduuliluku [-] (tässä $m_{koe} = 7$)
$\sigma'_{p\ koe}$	on ödometrikokeesta määritetty esikonsolidaatiojännitys [kPa] (tässä $\sigma'_{p\ koe} = 40$ kPa)
$\sigma'_{p\ lask}$	on laskennassa käytetty esikonsolidaatiojännitys [kPa] (tässä $\sigma'_{p\ lask}$ = vallitseva jännitys kullakin laskentasyvyydellä, koska savi on mallinnettu normaalisti konsolidoituneeksi)
β	on jännityseksponentti [-]

Ilman moduuliluvun sidontaa tehdään kappaleen 2.1.2 Kuvassa 3 esitetty virhe tangenttimoduulimenetelmän parametrien käytössä erityisesti kerroksen yläosassa, jossa vallitseva jännitys on pieni. Laskentaohjelmaan annettu moduuliluvun sidonta esikonsolidaatiojännitykseen ei vaikuta laskennassa muutoin käytettyyn saven konsolidaatiotilaan vaan ainoastaan laskennassa käytettäviin moduuliluvun arvoihin kullakin laskentasyvyydellä.

Tangenttimoduulimenetelmällä lasketut painumat ovat erittäin herkkiä moduuliluvun sidontaan käytetyn esikonsolidaatiojännityksen arvon muutoksiin suurilla negatiivisilla jännityseksponentin β arvoilla. Taulukossa 2 on esitetty lasketut maksimipainumat jännityseksponentilla $\beta = -1$ ja moduuliluvun eri sidontajännityksillä. Taulukosta 2 havaitaan, että käyttämällä liian pientä moduuliluvun sidontaan käytettyä esikonsolidaatiojännitystä voidaan tangenttimoduulimenetelmällä saada tulokseksi

täysin epärealistisia ja vääriä painumien arvoja. Tämä johtuu laskennassa käytetyn jännitys-muodonmuutoskuvaajan kääntymisestä lähes pystysuoraksi, kun parametreja käytetään liian pienillä jännityksillä kappaleen 2.1.2 Kuvan 3 tapaan.

Taulukko 2. Lasketut maksimipainumat moduuliluvun sidontaan käytetyn esikonsolidaatiojännityksen eri arvoilla.

Tangenttimoduulimenetelmä			
m	β	σ_c oedo [kPa]	maks. painuma [m]
7	-1	40	1,14
7	-1	30	1,52
7	-1	20	2,279
7	-1	10	4,559

Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmällä laskettaessa kyseistä virhemahdollisuutta ei ole, sillä kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä vastaa tangenttimoduulimenetelmää jännitysekspONENTILLA $\beta=0$. Näin ollen kokoonpuristuvuusindeksiä C_c ei tarvitse erikseen sitoa tiettyyn esikonsolidaatiojännitykseen tai muuntaa, vaikka laskennassa käytettäisiinkin jollakin syvyydellä hieman eri esikonsolidaatiojännitystä kuin mikä ödometrikokeesta on saatu tulokseksi kokoonpuristuvuusindeksin määrittämisessä.

Edellä esitetyn virhemahdollisuuden välttämisen lisäksi kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän hyötynä on myös, että sen parametrit voidaan helposti muuntaa eräiden FEM-laskennassa käytettävien myötölujittuvien materiaalmallien muodonmuutosparametreiksi. Tällaisia materiaalmalleja ovat esimerkiksi Modified Cam-Clay (MCC) sekä PLAXIS Soft Soil (SS). MCC-mallin muodonmuutosparametrit saadaan yhtälöillä (8) ja SS-mallin parametrit yhtälöillä (9). Ainakin PLAXIS 2D -laskentaohjelmassa näille materiaalmalleille voidaan antaa suoraan C_c :n ja C_r :n arvot, ja ohjelma laskee mallien muodonmuutosparametrit automaattisesti. (PLAXIS 2016).

$$\lambda = \frac{C_c}{\ln 10} \quad (8a)$$

$$\kappa = \frac{C_r}{\ln 10} \quad (8b)$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e_0} \quad (9a)$$

$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e_0} \quad (9b)$$

missä

λ	on MCC-mallin kokoonpuristuvuusindeksi [-]
κ	on MCC-mallin paisumisindeksi (Swelling Index) [-]
λ^*	on SS-mallin muunnettu kokoonpuristuvuusindeksi [-]
κ^*	on SS-mallin muunnettu paisumisindeksi (Swelling Index) [-]
e_0	on maakerroksen luonnontilainen huokosluku [-]

Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän muodonmuutosyhtälöiden yksinkertaisuuden, laskennallisten virhemahdollisuuksien vähentämisen sekä parametrien muunnettavuuden vuoksi tässä työssä kehitetty tietomallia hyödyntävä painumalaskentamoottori on toteutettu käyttämään kokoonpuristuvuusindeksimenetelmää. Näin ollen laskentamoottori soveltuu sellaisenaan vain saviille, joilla ödometrikokeesta määritetty jännityseksponentti β on vain lievästi negatiivinen. Laskentamoottoria voidaan käyttää myös savilla, joilla on suuri negatiivinen jännityseksponentin β arvo, mutta tällöin tulee kiinnittää erityistä huomiota kokoonpuristuvuusindeksin määrittämiseen siten, että sen arvo valitaan oikealta jännitysväliltä.

2.2 Jännityksen jakautuminen maapohjassa

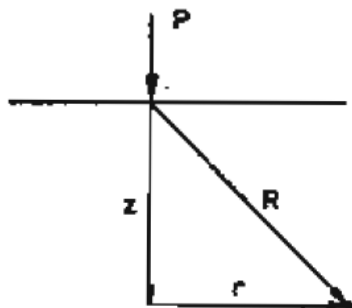
2.2.1 Jännitysjakaumateoriat

Painumalaskennan lähtötietona tarvitaan maan materiaaalimallin ja sen parametrien lisäksi tieto kuorman suuruudesta sekä sen aiheuttamien jännitysten jakaantumisesta maapohjassa. Kuorman aiheuttamien jännityslisäysten laskentaan onkin vuosien saatossa kehitetty lukusia teorioita.

Klassiseen maamekaniikkaan perustuvissa painumalaskelmissa käytetään enimmäkseen jännitysjakaumateorioita, joissa maa oletetaan homogeeniseksi, isotrooppiseksi ja lineaarisesti kimmoisaksi eli toisin sanoen Hooken lain oletetaan olevan voimassa. Todellisuudessa maan epähomogeenisuus ja anisotrooppisuus sekä plastiset muodonmuutokset vaikuttavat jännityksen jakautumiseen. Kokemus on kuitenkin osoittanut, että Hooken lakia noudattavat jännitysjakaumateoriat ovat painumalaskennan kannalta riittävän tarkkoja. Seuraavassa on esitetty eräitä painumalaskennassa useimmiten käytettyjä jännityslisäysten laskentateorioita. (RIL 157-1 1985, s. 313-314).

Maanpinnalla vaikuttavasta pistekuormasta aiheutuvat pystyjännityslisäykset laskeaan useimmiten Boussinesqin pistekuorman teorialla (10) (Poulos ja Davis 1974, s. 16). Kaavan (10) merkinnät on esitetty *Kuvassa 9*.

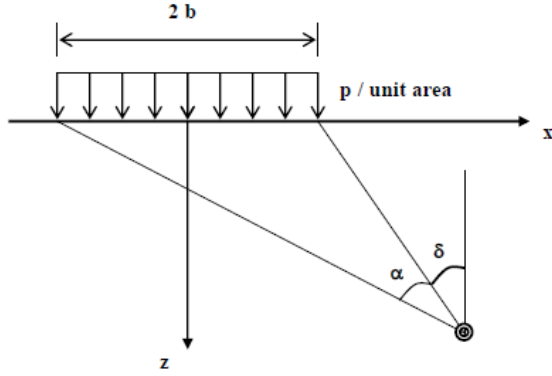
$$\Delta\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} \quad (10)$$



Kuva 9. Pistekuorman aiheuttamien jännityslisäysten laskennan merkinnät. (Poulos ja Davis 1974, s. 16).

Tasan jakautuneen nauhakuorman tapauksessa pystysuuntaiset jännityslisäykset lasketaan kaavalla (11) (Poulos ja Davis 1974, s. 36). Kaavaan (11) liittyvät merkinnät on esitetty Kuvassa 10. Kaavassa oletetaan, että tasainen kuormitus jatkuu äärettömästi leikkausta vastaan kohtisuorassa suunnassa.

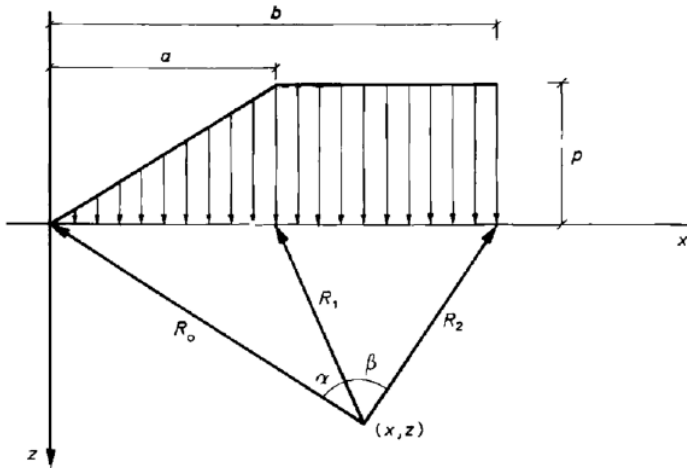
$$\Delta\sigma_z = \frac{p}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos(\alpha + 2\delta)] \quad (11)$$



Kuva 10. Tasaisesta nauhakuormasta aiheutuvien jännityslisäysten laskennan merkinnät. (Poulos ja Davis 1974, s. 36).

Pengerkuorman tapauksessa penkereen puolikkaan jännityslisäykset lasketaan kaavalla (12) (Poulos ja Davis 1974, s.40). Koko penkereestä aiheutuva jännityslisäys lasketaan summaamalla kummastakin puolesta aiheutuvat jännityslisäykset. Kaavaan (12) liittyvät merkinnät on esitetty Kuvassa 11.

$$\Delta\sigma_z = \frac{p}{\pi} \left[\beta + \frac{x\alpha}{a} - \frac{z}{R_2^2} (x - b) \right] \quad (12)$$



Kuva 11. Pengerkuormasta aiheutuvien jännitysten laskennan merkinnät. (Poulos ja Davis 1974, s. 40)

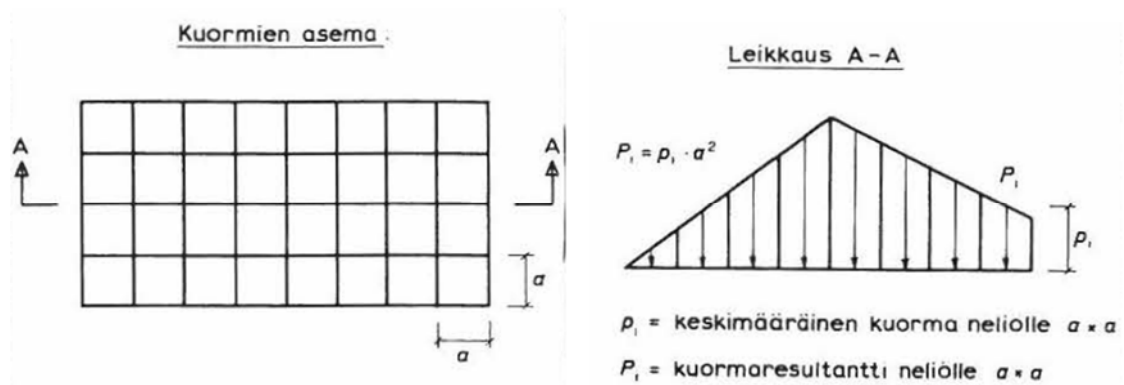
Kaava (12) soveltuu teoreettisesti sellaisenaan vain tapauksessa, jossa penkereen yläpinta sekä maanpinta ovat tasaisia ja vaakasuoria, ja penkereen poikkileikkaus jatkuu muuttumattomana leikkausta vastaan kohtisuorassa suunnassa. Todellisuudessa pinnat eivät koskaan ole täysin vaakasuoria, eikä kuormitustilanne ole täysin vakio leikkausta vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Mielivaltaisen muotoisen pengerkuorman aiheuttamien jännityslisäysten laskenta perustuu superpositioperiaatteeseen ja kuorman diskretointiin pienemmiksi osakuormiksi. Kuormitus voidaan esimerkiksi korvata paloittain tasan jakautuneilla nauhakuormilla, ja laskea kustakin nauhakuormasta aiheutuvat jännityslisäykset kaavalla (11). Kokonaisjännityslisäykset saadaan superpositioperiaatteella summaamalla kustakin nauhakuormasta aiheutuvat jännitykset. (RIL 157-1 1985, s. 330-331).

Kolmiulotteisen pengerkuorman tapauksessa jännityslisäykset voidaan laskea numeerisella integroinnilla seuraavasti:

1. Diskretoidaan kuormitusalue neliön muotoisiksi alueiksi, joissa kuormitus on kunkin neliön keskimääräisestä pengerkorkeudesta aiheutuva kuormitus.
2. Korvataan neliökuormat pistekuormina eli neliökuormien resultantteina neliöiden keskipisteissä.
3. Lasketaan kustakin pistekuormasta aiheutuvat jännityslisäykset kaavalla (10).
4. Summataan kustakin pistekuormasta aiheutuvat jännityslisäykset.

Diskretoinnin periaate on esitetty Kuvassa 12. Pengerkuorman diskretoinnin sivun mitan tulisi olla pienempi kuin $1/3$ tarkasteltavan pisteen syvyydestä, jolloin numeerisen integroinnin menetelmätarkkuus on vähintään 95 %. (RIL 157-1 1985, s. 331-334).



Kuva 12. Kuorman diskretoinnin periaate. (RIL 157-1 1985, s. 334).

Työssä toteutettu painumalaskentamoottori käyttää jännityslisäysten laskennassa edellä esitettyä numeerisen integroinnin periaatetta sekä Boussinesqin pistekuorman teoriaa, kaava (10). Kaavassa (10) käytetty syvyys z on moottorissa numeeristen ongelmien välttämiseksi rajoitettu siten, että $z \geq 1 \text{ m}$. Testilaskelmien perusteella on havaittu, että riittävän tarkkaan lopputulokseen päästään yleensä käyttämällä pengerkuorman diskretoinnin sivun mittana 0,5 metriä.

2.2.2 Kuivakuorikerroksen vaikutus jännitysjakaumaan

Usein pehmeän savikerroksen päällä on savea huomattavasti jäykempi kuivakuorikerros, jolloin Boussinesqin teoriassa oletettu maan homogeenisuus ei täysin pidä paikkaansa. Jäykällä kuivakuorikerroksella on kuormaa jakava vaikutus, jolloin kuorman aiheuttamat jännitykset savikerroksessa ovat pienempiä. Tämän vaikutuksen suuruus riippuu kuivakuorikerroksen jäykkyydestä, paksuudesta ja rakenteesta. Jos kuivakuorikerros on halkeillutta, on kuormaa jakava vaikutus huomattavasti vähäisempi. (Larsson et al. 1997, s. 37).

Kuivakuorikerroksen kuormaa jakavaa vaikutusta voidaan arvioida alun perin Burmisterin (1943) kehittämällä kaavalla (13). Kuivakuorikerros muutetaan kaavalla saven jäykkyyden omaavaksi kerrokseksi, ja jännityslaskelmat tehdään muunnetuilla kerrospaksuuksilla ja syvyyskoordinaateilla. (Larsson et al. 1997, s. 37).

$$h_e = 0,9h \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

missä	h_e	on kuivakuorikerroksen muunnettu paksuus [m]
	h	on kuivakuorikerroksen alkuperäinen paksuus [m]
	E_1	on kuivakuoren kimmomoduuli [kN/m ²]
	E_2	on saven kimmomoduuli [kN/m ²]

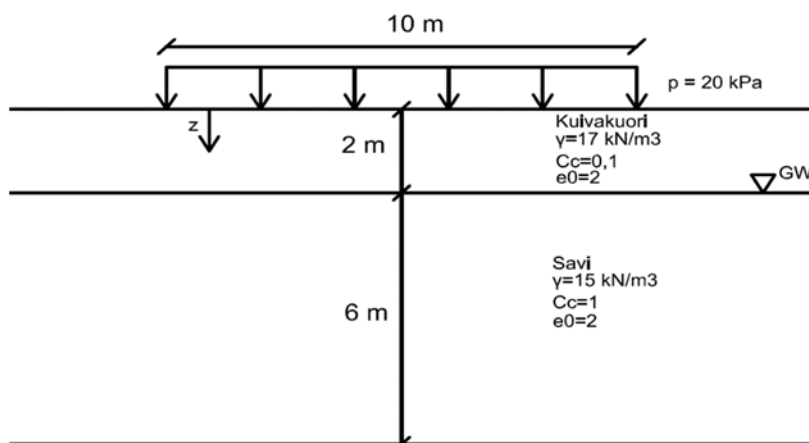
Boussinesqin jännitysteorioiden kaavoissa käytetään tällöin savikerroksessa muunnettua syvyyttä z' , kaavat (14) (Larsson et al. 1997, s. 37; RIL 157-1 1985, s. 340).

$$z' = \frac{h_e}{h} z \quad \text{kun } z \leq h \quad (14a)$$

$$z' = \frac{h_e}{h} z + z - h \quad \text{kun } z \geq h \quad (14b)$$

missä	z'	on muunnettu syvyys [m]
	z	on alkuperäinen syvyys [m]

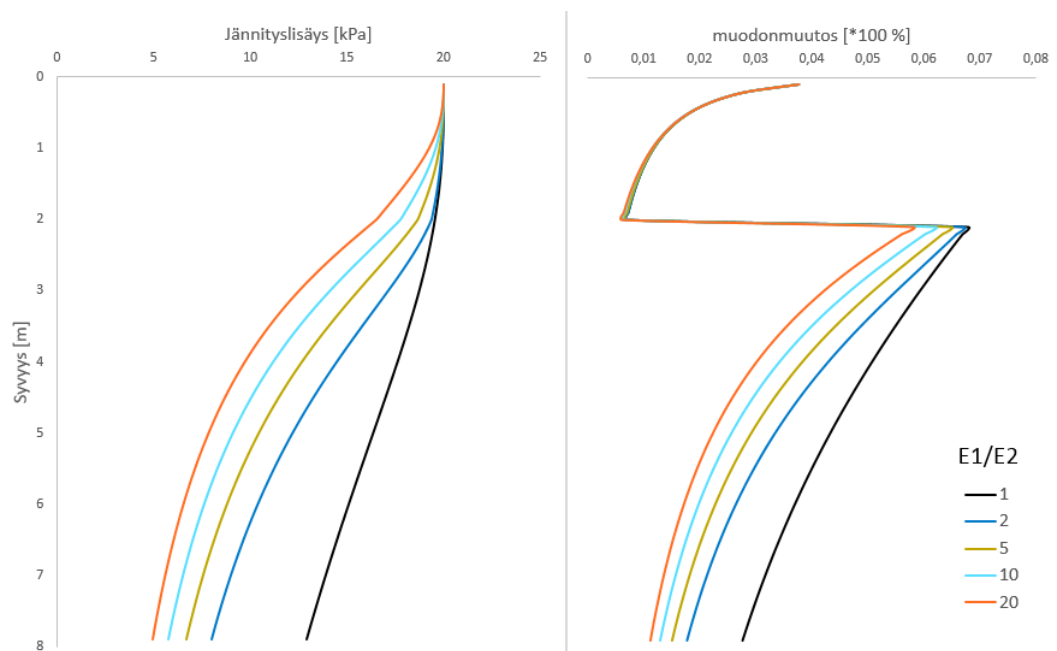
Seuraavassa on tarkasteltu esimerkkilaskelmalla kuivakuorikerroksen jäykkyyden vaikutuksen suuruusluokkaa tasaisen nauhakuorman keskipisteen alla. Laskelman geometria on esitetty Kuvassa 13.



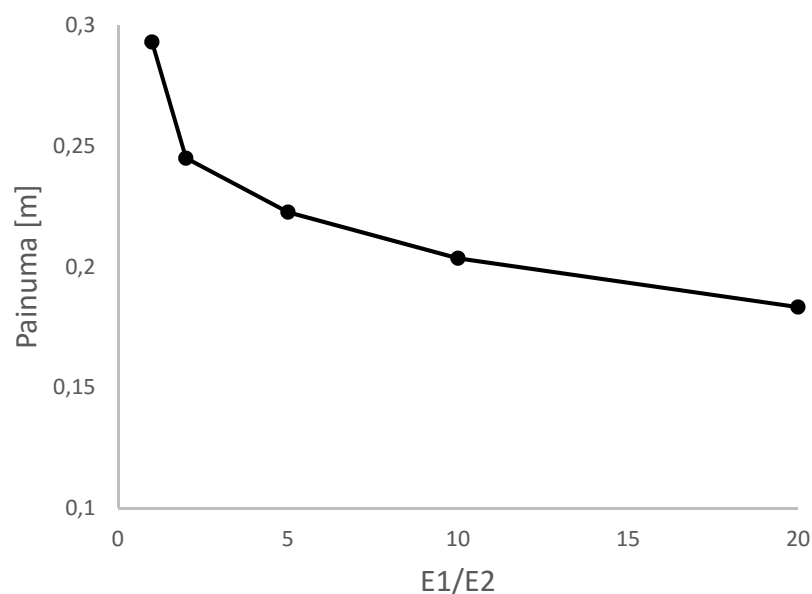
Kuva 13. Kuivakuoren vaikutuksen esimerkkilaskelman geometria.

Kuvassa 14 on esitetty kuorman aiheuttamat jännityslisäykset ja muodonmuutos-%:n jakaumat laskennassa käytetyn jäykkyysien suhteen E_1/E_2 eri arvoilla. Jännityslisäykset on laskettu kappaleen 2.2.1 nauhakuorman kaavalla (11). Kuvasta havaitaan, että teoreettisesti jännitys- ja muodonmuutosjakaumat muuttuvat savikerroksessa tässä tapauksessa merkittävästi jo jäykkyysuhteella $E_1/E_2=2$.

Eri jäykkyysuhteilla lasketut painumat on esitetty Kuvassa 15. Maakerrokset on oletettu normaalisti konsolidoituneeksi. Kuten olettaa saattaa, laskettujen painumien suuruus pienenee, kun jäykkyysuhde kasvaa. Burmisterin teoriassa kuitenkin oletetaan, että kuivakuorikerros kestää vetoa, mikä harvoin pitää todellisuudessa täysin paikkaansa (Larsson et al. 1997, s. 37).



Kuva 14. Jännityslisäykset ja muodonmuutos-% eri jäykkyysuhteilla.



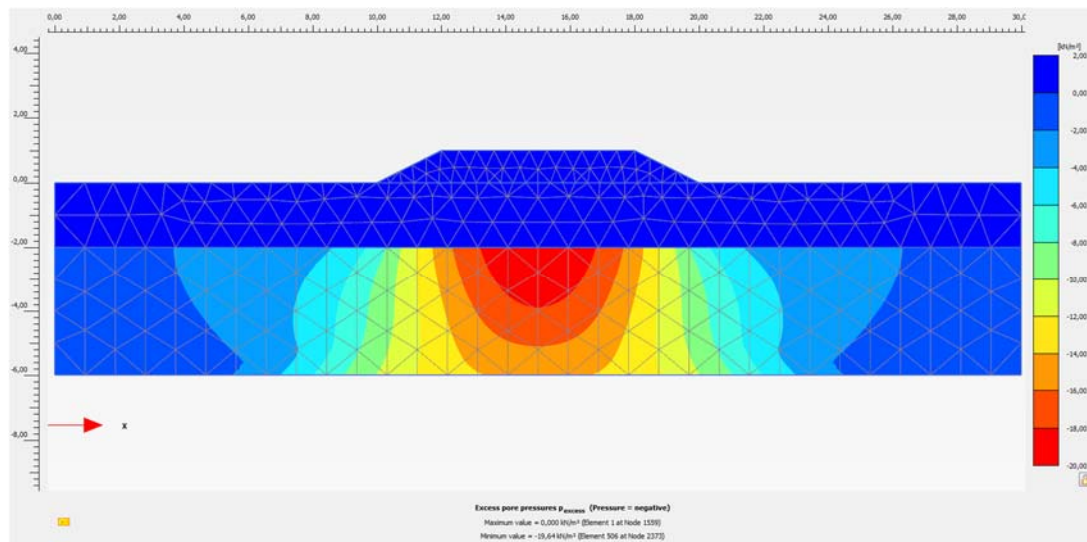
Kuva 15. Painumat eri jäykkyysuhteilla laskettuna.

Seuraavassa on tarkasteltu FEM-laskennalla kuivakuoren jäykkyyden vaikutusta jännityksiin savikerroksessa. FEM-laskennassa huomioidaan kerrosten väliset jäykkyyserot automaattisesti. Laskennassa savikerros on mallinnettu Soft Soil (SS) -mallilla, ja kuivakuorikerros sekä penger Mohr-Coulomb (MC) -mallilla. Laskentatuloksista tarkasteltiin saven jännityksen muutosta, kun muutetaan kuivakuorikerroksen jäykkyys kymmenkertaiseksi. Laskennassa käytetyt parametrit on esitetty Taulukossa 3.

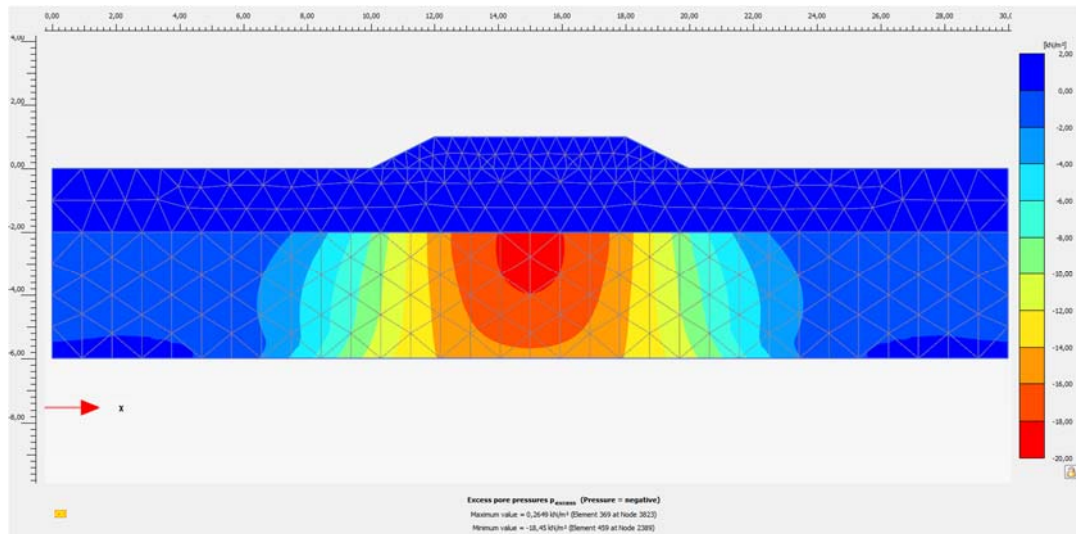
Taulukko 3. FEM-laskennan parametrit

Kerros	h [m]	Malli	E [kN/m ²]	Cc	eo	c [kPa]	ϕ [°]
Penger	1	MC	40 000			1	40
Kuivakuori	2	MC	2 000 / 20 000			10	30
Savi	4	SS		1	2	5	15

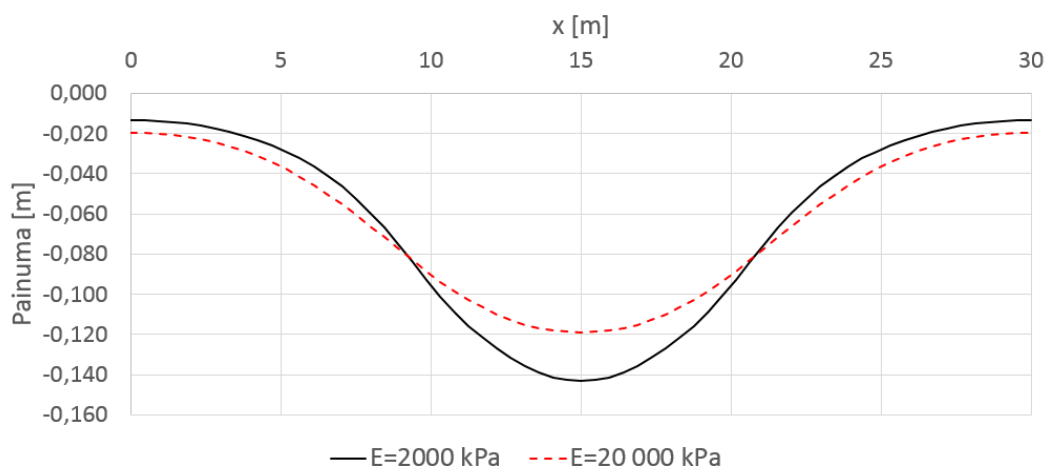
Kuvassa 16 on esitetty savikerroksen huokosveden ylipaineiden jakauma välittömästi pengerkuorman asettamisen jälkeen, kun kuivakuorikerroksen kimmomoduuli $E=2000 \text{ kN/m}^2$. Kuvassa 17 on esitetty vastaava jakauma kuivakuorikerroksen kimmomoduulilla $E=20\,000 \text{ kN/m}^2$. Kuvassa 18 on esitetty eri jäykkyyksillä lasketut kuivakuoren alapinnan avoimen tilan pystysiirtymät. Kuivakuorikerroksen muodonmuutoksista aiheutuvat painumat eivät ole kuvaajissa mukana.



Kuva 16. Huokosveden ylipaineet savikerroksessa, kun kuivakuorikerroksen $E=2000 \text{ kN/m}^2$. Maksimiarvo 19,64 kPa.



Kuva 17. Huokosveden ylipaineet savikerroksessa, kun kuivakuorikerroksen $E=20\,000\text{ kN/m}^2$. Maksimiarvo $18,45\text{ kPa}$.



Kuva 18. Kuivakuoren alapinnan pystysiirtymät kuivakuoren eri jäykkyyksillä.

Kuvista huomataan, että kuivakuorikerroksen suhteellinen jäykkyys vaikuttaa jonkin verran jännitys jakaumaan sekä laskettuihin painumiin. Vaikutus lasketuissa painumissa on kuitenkin kohtalaisen pieni, ja todennäköisesti muut laskentaparametrit vaikuttavat painumiin huomattavasti enemmän. FEM-tarkastelun perusteella voitaneen todeta, että kuivakuorikerroksen kuormaa jakava vaikutus voidaan painumalaskelmissa jättää huomiotta laskentatarkkuuden kärsimättä kovin merkittävästi. Kokeelliset mittaukset ovat lisäksi osoittaneet, että todellinen jännitys jakauma noudattaa paremmin korjaamatonta jakaumaa kuin kaavoilla (13) ja (14) korjattua jakaumaa, kun jäykempi kerros on vetoa kestävä (RIL 157-1 1985, s. 341-342). Näin voidaan halkeilleen kuivakuorisaven tapauksessa olettaa.

Edellä esitetyistä seikoista johtuen, sekä laskennan yksinkertaistamiseksi tässä työssä kehitetyssä painumalaskentamoottorissa ei huomioida kuivakuoren kuormaa jakavaa vaikutusta. Kuorman aiheuttamat jännityslisäykset lasketaan suoraan Boussinesqin teoriolla ilman kerrospaksuuksien ja syvyyskoordinaattien korjausta.

2.2.3 Nosteen aiheuttama jännityksen muutos

Pengerkuormasta aiheutuva jännitys muuttuu nosteen vaikutuksesta, kun osa maakerroksesta tai penkereestä painuu pohjavedenpinnan alapuolelle. Leroueil et al. (1990, s. 209) ovat ehdottaneet tämän huomioimista muuttamalla laskennassa käytettyä pengerkuormaa kaavalla (15). Ilman kuorman muuttamista yliarvioidaan painumia erityisesti tapauksessa, jossa odotetut painumat ja näin ollen nosteen aiheuttamat jännitysmuutokset ovat suuria.

$$\Delta q = -\frac{\gamma_w S}{2} + \Delta \gamma S \quad (15)$$

missä

Δq	on kuorman muutos [kPa]
γ_w	on veden tilavuuspaino = 10 kN/m ³
S	on alkuperäisellä kuormalla laskettu painuma [m]
γ	on pohjavedenpinnan alapuolelle painuvan maan vedellä kyllästymisen aiheuttama tilavuuspainon muutos [kN/m ³]

Liikenneviraston suunnitteluohjeistuksen mukaan, kun pohjavedenpinnan tason oletetaan pysyvän samana koko konsolidaatioprosessin ajan, muuttuu jännitys painumattomassa pohjassa kaavan (16) mukaisesti. Liikenneviraston ohjeessa jätetään huomiotta maan vedellä kyllästymisen aiheuttama lisäys kuormaan ja jännityksiin. Laskennan tarkentamiseksi tulisi painumien ja niiden aiheuttamien jännitysmuutosten laskenta tehdä iteratiivisesti. (Leroueil et al. 1990, s. 211; Liikennevirasto 2010, s. 38).

$$\Delta \sigma = -\gamma_w S \quad (16)$$

Työssä kehitettyyn painumalaskentamoottoriin on implementoitu mahdollisuus painumien laskentaan noste huomioiden. Tällöin laskenta tehdään kasvattamalla kuormaa inkrementaalisesti, ja vähentämällä kuormasta kullakin kuormainkrementillä lasketun painuman aiheuttama noste kaavalla (16). Laskentamoottorissa ei huomioida maan kyllästymisen aiheuttamaa kuorman lisäystä. Moottorin käyttämät nosteen laskentaan liittyvät yhtälöt on esitetty tarkemmin kappaleessa 4.2.4. Nosteen huomioimisen vaikutusta laskettujen painumien suuruuteen on käsitelty kappaleessa 4.3.5.

2.3 3D painumalaskennassa

Tangenttimoduuli- ja kokoonpuristuvuusindeksimenetelmissä tarkastellaan vain pystysuuntaisen jännityksen muutoksista aiheutuvia muodonmuutoksia. Todellisuudessa pohjamaassa vallitsee kuitenkin aina kolmiulotteinen jännitystilä, mikä vaikuttaa maan pystysuuntaisiin muodonmuutoksiin pengerkuorman alla. Yleisesti ottaen maan jännitys- ja muodonmuutoskomponentteja on molempia 6 kpl, ja niiden välistä yhteyttä kuvataan yhtälöllä (17) (Potts ja Zdravković 1999, s. 7).

$$\begin{Bmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \sigma_z \\ \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{xz} \\ \Delta \tau_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \varepsilon_z \\ \Delta \gamma_{xy} \\ \Delta \gamma_{xz} \\ \Delta \gamma_{zy} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

eli $\Delta\sigma = [D]\Delta\varepsilon$

missä $[D]$ on materiaalimallimatriisi, joka sisältää materiaali-parametrit

Esimerkiksi lineaarisesti kimmoisan aineen matriisi D on muotoa:

$$\frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{2}-\nu\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{2}-\nu\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{2}-\nu\right) \end{bmatrix}$$

missä E on kimmomoduuli [kN/m²]
 ν on Poissonin luku [-]

Lineaarisesti kimmoisan aineen matriisista D havaitaan, että kyseisellä materiaalimallilla kunkin akselin suuntaiset muodonmuutokset riippuvat myös muiden akselien suuntaisista jännityksistä.

Tangenttimoduuli- ja kokoonpuristuvuusindeksimenetelmissä käytettävissä materiaalimalleissa oletetaan, että pystysuuntainen muodonmuutos riippuu ainoastaan pystysuuntaisesta jännityksestä. Tällöin, jos z-akseli on pystysuuntainen, on näissä materiaalimalleissa matriisin D alkioista ainoastaan D_{33} nolasta poikkeava. Tämä vastaa ödometrikokeen tilannetta, jossa näytteen muodonmuutos on yksisuuntainen, vaikka näytteessä vallitsee kolmiulotteinen (aksisymmetrinen) jännitystila. Kokeen vaakasuuntaista jännitystä ei kuitenkaan tiedetä tarkasti. (Korhonen et al. 1993, s. 43; Potts ja Zdravković 2001, s. 3).

Ödometrikokeen vaakajännitystä voidaan arvioida likimääräisesti käyttäen kaavaa (18). Kaavassa (18) esiintyvän lepopainekertoimen K_0 määrittämiseen ei kuitenkaan ole yksiselitteistä menetelmää, joten vaakajännityksen arviointi on aina karkeaa ja sisältää epätarkkuutta. (Potts ja Zdravković 2001, s. 4).

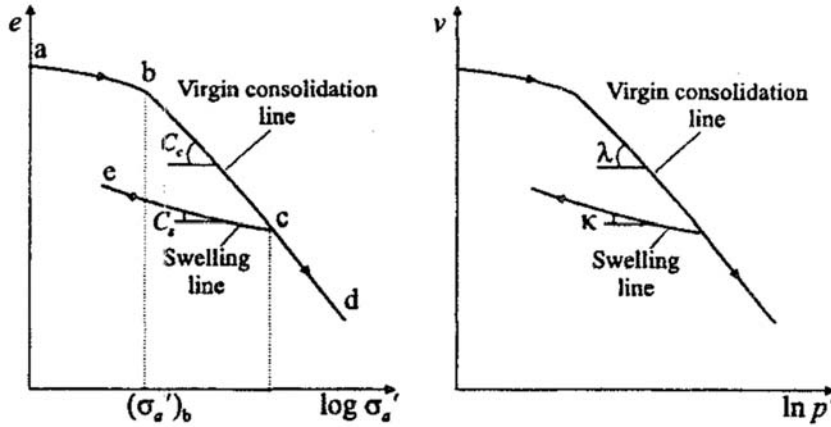
$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v \quad (18)$$

missä σ'_h on tehokas vaakajännitys [kPa]
 σ'_v on tehokas pystyjännitys [kPa]
 K_0 on lepopainekerroin [-]

Jos vaakajännitys tiedetään, voidaan ödometrikokeen tulos laajentaa kolmiulotteiseen jännitystilaan arvioimalla kokeen aikana hydrostaattista jännitystä p' kaavalla (19) ja muodostamalla kokeesta kuvaaja, jossa vaaka-akselilla on $\ln p'$ ja pystyakselilla ominaistilavuus $v = 1 + e$. Tällöin kuvaajan normaalikonsolidoituneen osan kaltevuus on λ , joka lasketaan kaavalla (20). Ödometrikokeen kuvaajan laajentamista kolmiulotteiseen jännitystilaan on havainnollistettu Kuvassa 19. (Potts ja Zdravković 2001, s. 4).

$$p' = \frac{\sigma'_{\nu} + 2\sigma'_{\text{h}}}{3} \quad (19)$$

$$\lambda = \frac{\Delta v}{\Delta(\ln p')} \quad (20)$$



Kuva 19. Ödometrikokeen tuloksen laajentaminen kolmiulotteiseen jännitystilaan. (Potts & Zdravković 2001, s. 4).

Kappaleessa 2.1.3 esitetyt kokoonpuristuvuusindeksin ja MCC- sekä SS-mallien muodonmuutosparametrien yhteydet (8) ja (9) perustuvat edellä esitettyyn analogiaan. Ne sisältävät kuitenkin oleellisena osana oletuksen, jossa lepopaine kerroin K_0 pysyy erikseen yli- ja normaalikonsolidoituneella osalla vakiona. (Potts ja Zdravković 2001, s. 4).

Perinteisillä menetelmillä lasketut painumat ovat usein MCC- tai SS-mallilla tehtyä FEM-laskentaa suurempia, vaikka FEM-laskennan parametrit olisi johdettu saman ödometrikokeen tuloksista (mm. Lojander ja Vepsäläinen 2001; Alanen 2013, s. 77-78; Köylijärvi 2015, s. 76-77). Koska FEM-laskennan materiaalimalleissa tarkastellaan pelkän pystyjännityksen sijaan hydrostaattista jännitystä p' sekä deviatorista jännitystä q , vaikuttavat FEM-laskennassa vaakajännitykset aina myös pystysuuntaisiin muodonmuutoksiin. Tämä selittää ainakin osittain eroa FEM-laskennalla ja perinteisillä menetelmillä lasketuissa painumissa.

Koska ödometrikokeen vaakasuuntaista jännitystä ei tarkkaan tiedetä, soveltuvat ödometrikokeesta määritetyt muodonmuutosparametrit teoriassa sellaisenaan käytettäväksi ainoastaan tilanteissa, joissa muodonmuutostila on ödometrikokeen tapaan puhtaasti yksiulotteinen. Tämä toteutuu leveän ja matalan tiepenkereen alla olevassa maassa likimääräisesti. (Korhonen et al. 1993, s. 44).

Kapeiden ja selvästi kolmiulotteisten kuormitustilanteiden painumien laskennassa tulisi huomioida kolmiulotteinen jännitystila. Tällaiseen laskentaan soveltuu nykyisin laajassa käytössä olevista menetelmistä lähinnä ainoastaan FEM-laskenta. Tässä työssä toteutetussa tietomallia hyödyntävässä painumalaskentamoottorissa tarkastellaan kuormitusta kolmiulotteisena, mutta painumat lasketaan tarkastelemalla ainoastaan pystysuuntaisia jännityksiä ja käyttämällä kokoonpuristuvuusindeksiä sellaisenaan. Tästä johtuen, kun moottorilla lasketaan kuormitustilanteita, jotka eivät ole kovin laajoja, tulee laskennan tuloksiin suhtautua varauksin.

Kolmiulotteinen jännitystila sekä maaperän anisotrooppisuus vaikuttavat erityisesti aika-painuman laskentaan. Tavanomainen, esimerkiksi GeoCalc -laskentaohjelman käyttämä aika-painumalaskenta perustuu Terzaghin konsolidaatioteoriaan, jossa otetaan huomioon vain veden pystysuuntainen virtaus (Terzaghi 1925, Vepsäläinen ja Takala 2004). Kapeissa ja kolmiulotteisissa kuormitustilanteissa teorian oletukset pätevät huonosti, joten aika-painuman laskenta tulisi tällöin tehdä jollakin muulla menetelmällä, esimerkiksi käyttäen Biotin kolmiulotteista konsolidaatioteoriaa (Biot 1941). Kolmiulotteisen konsolidaation laskenta vaatii kuitenkin anisotrooppiset parametrit, joiden määrittäminen on hankalaa.

Edellä esitetystä johtuen tässä työssä kehitetyllä painumalaskentamoottorilla ei ole mahdollista laskea aika-painumaa, vaan ainoastaan primaarisen konsolidaation loppuarvoja. Moottoriin on kuitenkin mahdollista myöhemmin implementoida yksiulotteiseen konsolidaatioon perustuva aika-painumalaskenta ilman suurempaa olemassa olevan koodin muokkausta. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi erillisellä funktiolla, joka muuttaa tehokasta jännitystä ajan myötä Terzaghin konsolidaatioteoriaan perustuen. Aika-painuman implementoiminen vaatii kuitenkin jonkin numeerisen menetelmän, esimerkiksi differenssimenetelmän tai GeoCalcinkin käyttämän Galerkinin elementtimenetelmän ohjelmointia. Aika-painuman laskennassa on joka tapauksessa huomioitava, että yksiulotteista konsolidaatiota voidaan riittävällä tarkkuudella käyttää vain tilanteissa, joissa konsolidoituvan maakerroksen paksuus on enintään puolet penkereen alaosan leveydestä (Vepsäläinen 1994, s. 39).

3 Tietomalli painumalaskennan lähtötietona

3.1 Yleistä

Nykykäytännöllä painumalaskennassa käytettävä poikkileikkausgeometria muodostetaan useimmiten joko suoraan suunnitteluohjelmistosta tulostetusta .dxf –muodossa olevasta poikkileikkauksesta, tai laskentaohjelmistossa erikseen manuaalisesti. Laajalti käytössä olevissa GeoCalc- ja PLAXIS 2D -ohjelmissa suunnittelujärjestelmää saatua poikkileikkausta ei kuitenkaan sellaisenaan voida suoraan käyttää laskentamallina, vaan sitä täytyy aina jatkokäsitellä laskentaohjelmistolla. Laskentaohjelmistossa on erikseen määriteltävä esimerkiksi maakerrosrajat sekä pohjavedenpinnan taso.

Työn yhtenä tavoitteena oli, että tietomallin sisältämää informaatiota voidaan suoraan käyttää laskennan geometrian ja kuormitusolosuhteiden lähtötietona. Tämä toteutettiin ainakin osittain siten, että tietomallin Inframodel-formaatin tiedostosta kopioidaan tarvittavat tiedot, ja muokataan laskentamoottorin tarvitsemaan muotoon. Työn laajuuden rajoissa ei ollut mahdollista toteuttaa ohjelmakoodia, joka käyttäisi tietomallin Inframodel-formaattia sellaisenaan. Inframodel-tiedoston tietojen muokkausta on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.2.1.

3.2 Inframodel-formaatti

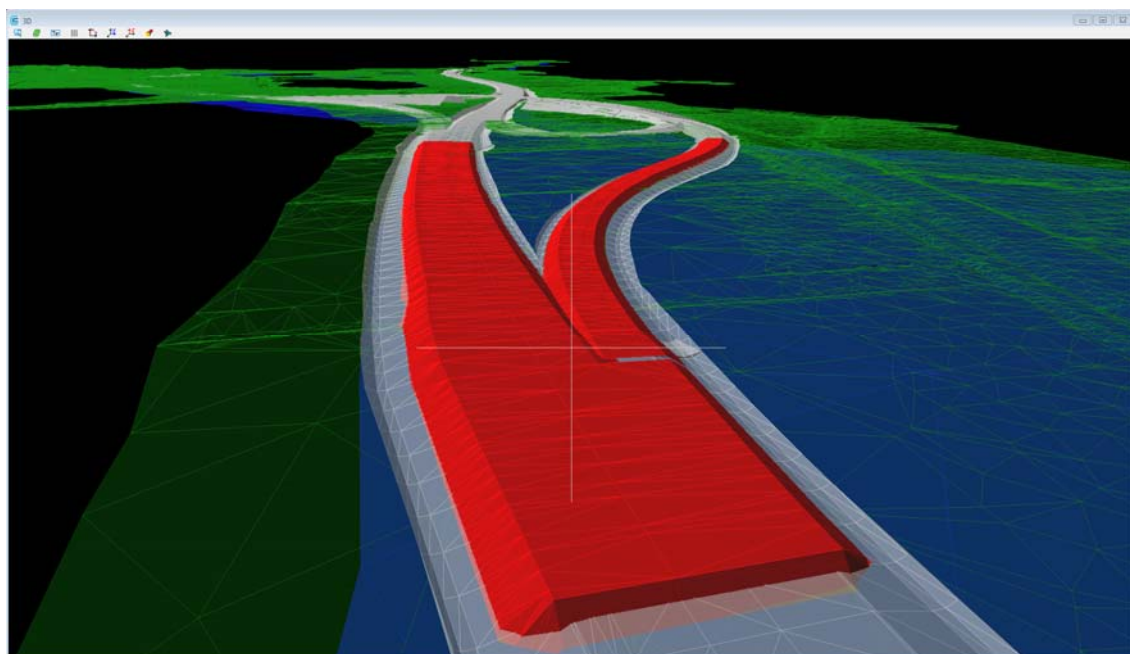
Infra-alan tietomallinnuksessa käytetään Suomessa Inframodel-formaattia, joka perustuu kansainväliseen LandXML-standardiin. Inframodel-tiedosto on tekstimuotoinen ja sitä voidaan tarkastella esimerkiksi selaimella tai tekstieditorilla. Tällä hetkellä yleisessä käytössä oleva formaatin versio Inframodel 3 on julkaistu vuonna 2013. Painumalaskennan kannalta olennaisimmat Inframodel 3 -formaatin sisältämät tiedot on esitetty *Taulukossa 4*. (Liukas 2013).

Taulukko 4. Painumalaskennan kannalta oleelliset Inframodel 3 -formaatin sisältämät tiedot. (muokattuna, Liukas 2013).

Kokonaisuus	Sisältö
Suunnitelman yleistiedot	-projekti -suunnitelma -yksiköt -koordinaattijärjestelmät
Perusaineisto	-maastomallin ja maaperämallin pinnat -kolmiopinnat
Liikenneväylät (tie, rata, katu)	-rakenne taiteviivoina ja kolmiopintoina
Aluesuunnittelu	-pintamaiset rakenteet -maisemointi, läjitykset
Pohjanvahvistus	-pintamaiset rakenteet -vastapenger, ylipenger, massanvaihto

Uudempi versio, Inframodel 4, on julkaistu vuonna 2016 ja se on tarkoitus ottaa käyttöön vuoden 2017 aikana. Tie- ja ratapenkereiden painumamitoituksen kannalta olennaisimpina uudistuksina uudessa versiossa ovat mahdollisuudet maaperän ominaisuustietojen sekä toteumatiedon liittämiseen tietomallin. (bSF 2016).

Painumalaskentaa varten tarvittaviin maakerrosrajojen sekä leikkausten ja penkereiden geometriatietoihin päästään käsiksi tarkastelemalla kyseisten pintojen koordinaattitietoja Inframodel-tiedostoista. *Kuvassa 20* on esimerkki tietomallin 3D-havainnollistuksesta, jossa on näkyvissä yleissuunnitelman mukainen tierakenteen yläpinta, esikuormituspenkereen toteutuspinna, maanpinta sekä saven alapinta. *Kuvassa 21* on ote *Kuvan 20* esikuormituspenkereen Inframodel 3 -formaattissa olevasta tiedostosta. Inframodel-formaatti sisältää pintojen kolmioiden kärkipisteiden koordinaatit ("Pnts") ja kunkin kolmion ("Faces") linkityksen kyseisiin pisteisiin. Painumalaskennan kannalta muuta tietoa, kuten metatietoja tai esimerkiksi taiteviivojen koordinaatteja ei sinällään tarvita.



Kuva 20. Esimerkki tietomallin kolmiopinnoista.

```

- <Surfaces name="Vt3">
  - <Surface name="Esikuormituspengeri" OID="181600">
    <SourceData/>
    - <Definition surfType="TIN">
      - <Pnts>
        <P id="1">6987493.906000 21549945.724000 12.664000</P>
        <P id="2">6987495.283000 21549943.797000 12.676000</P>
        <P id="3">6987498.988000 21549949.361000 12.852000</P>
        <P id="4">6987495.066000 21549974.112000 13.082000</P>
        <P id="5">6987496.480000 21549976.031000 11.594000</P>
        -----
        <P id="905">6987625.236000 21549738.353000 12.751000</P>
        <P id="906">6987632.044000 21549743.010000 14.159000</P>
        <P id="907">6987632.518000 21549741.928000 12.988000</P>
        <P id="908">6987634.163000 21549742.757000 11.871000</P>
        <P id="909">6987633.820000 21549742.221000 11.871000</P>
        <P id="910">6987633.278000 21549741.376000 11.871000</P>
        <P id="911">6987625.603000 21549737.606000 11.922000</P>
        <P id="912">6987632.852000 21549741.167000 12.165000</P>
      </Pnts>
      - <Faces>
        <F>1 2 3</F>
        <F>4 5 6</F>
        <F>6 7 4</F>
        <F>8 1 9</F>
        <F>10 11 12</F>
        <F>13 14 15</F>
        <F>14 10 16</F>
        <F>17 18 19</F>
        <F>20 3 2</F>
      </Faces>
    </Definition>
  </Surface>
</Surfaces>

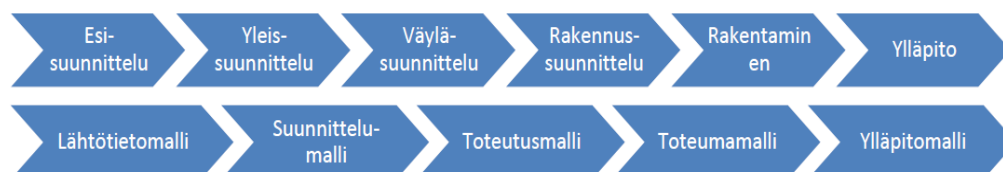
```

Kuva 21. Ote esikuormituspenkereen kolmiopinnasta Inframodel-formaatissa. (Muokattuna, A-Insinöörit 2015).

Nykyisin käytössä olevassa Inframodel 3 -formaattissa ei ole mahdollista sisällyttää tietomalliin maaparametreja. Uudessa Inframodel 4 -formaattissa on mahdollisuus maan ominaisuuksien sisällyttämiseen, mutta painumalaskelmien riittävän tarkkuuden saavuttamiseksi parametrien mallintaminen ja sisällyttäminen riittävän kattavasti vaikuttaa haastavalta ja työläältä. Tämän vuoksi työssä toteutettu painumalaskenta-moottori on toteutettu siten, että maaparametrit annetaan laskennassa erikseen.

3.3 Tietomalliin liittyvä epätarkkuus

Infrahankkeen vaiheet sekä tietomallipohjaisen hankkeen inframallit on esitetty Kuvassa 22. Tietomallipohjaisissa hankkeissa vaadittava mallintamisen laajuus ja tarkkuustaso vaihtelevat hankkeen suunnitteluvaiheesta riippuen ja myös hankkeesta toiseen. Tarkkuustaso voi vaihdella myös inframallin sisällä. Suunnitteluprosessin aikana, kun suunnitelmat ovat vielä luonnosvaiheessa, ei mallintamiselle kannata asettaa liian tiukkoja tarkkuusvaatimuksia, jotta välttyään ylimääräiseltä ja turhalta työltä. Jokaisessa suunnitteluvaiheessa on kuitenkin aina tiedostettava malliaineiston sen hetkinen tarkkuustaso. (Janhunen et al. 2015; Liukas ja Kempainen 2015).



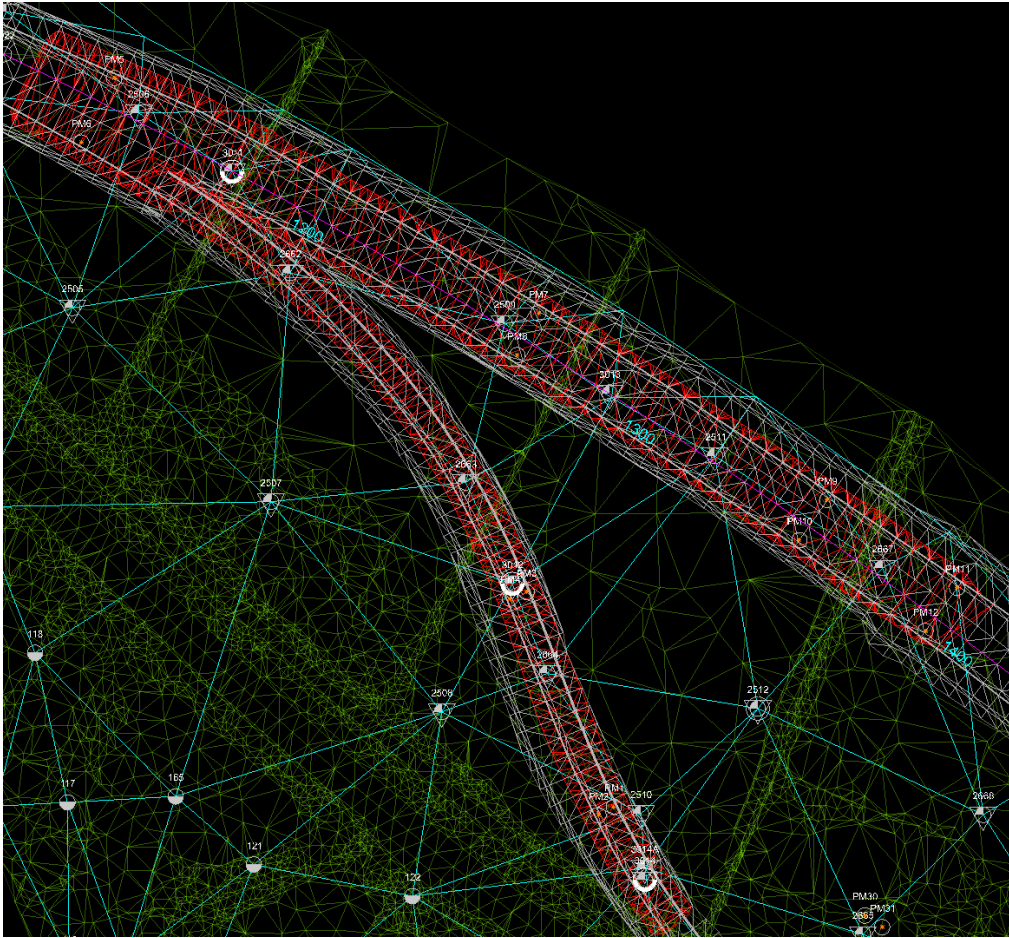
Kuva 22. Infrahankkeen vaiheet ja inframallit. (Mäkinen et al. 2016).

Kuvan 20 esimerkissä tarkkuustaso vaihtelee mallin sisällä. Kuvan pinnat esikuormituspengertä lukuun ottamatta ovat väyläsuunnittelun aikaisia, ja näin ollen esimerkiksi maakerrosrajat on mallinnettu kohtalaisen harvoja pohjatutkimustietoja käyttäen. Lisäksi esimerkiksi tien tasaus on alustava suunnitelma, joka on todellisuudessa myöhemmin muuttunut hieman. Kuvan esikuormituspengeri sen sijaan on rakennussuunnittelun/rakentamisen aikainen toteutusmallipinta, jota on käytetty koneohjausmallina, kun pengertä on rakennettu työkoneautomaatiota hyödyntäen.

Vaikka tietomalli on tarkimmillaan tapauksessa, jossa pintoja käytetään rakentamisessa koneohjausmallina, sisältää malli yleensä silti epätarkkuutta. *Kuvan 20* esikuormituspenkereen tapauksessa tietomalli kuvaa suunniteltua rakennetta muutoin millimetrien tarkkuudella, mutta penkereen päätyluiskat on mallinnettu siten, että ne osoittavat luiskan kaltevuuden, mutta eivät jatku maanpintaan saakka (A-Insinöörit 2015). Lisäksi päätien ja erkanevan rampin esikuormituspenkereet on mallinnettu erillisinä, ja näiden yhteensovittamisesta aiheutuu epätarkkuutta, joka on havaittavissa *Kuvasta 20*.

Painumalaskennan kannalta oleellista on, mikä on tietomallin tarkkuustaso suunniteltujen rakenteiden, maanpinnan sekä maakerrosrajojen osalta. Maanpinta on usein mallinnettuna hyvinkin tarkasti jo lähtötietomallista lähtien, koska mittatietoa ja esimerkiksi laserkeilausaineistoa maanpinnan koroista on usein jo paljon saatavilla. Maakerrosrajojen pintamallit sen sijaan perustuvat usein varsinkin suunnitteluprosessin alkuvaiheessa kohtalaisen harvoin pohjatutkimuksiin. Kuivakuorikerroksen alapintaa tai pohjavedenpintaa ei usein edes mallinneta, varsinkaan aikaisissa suunnittelun vaiheissa.

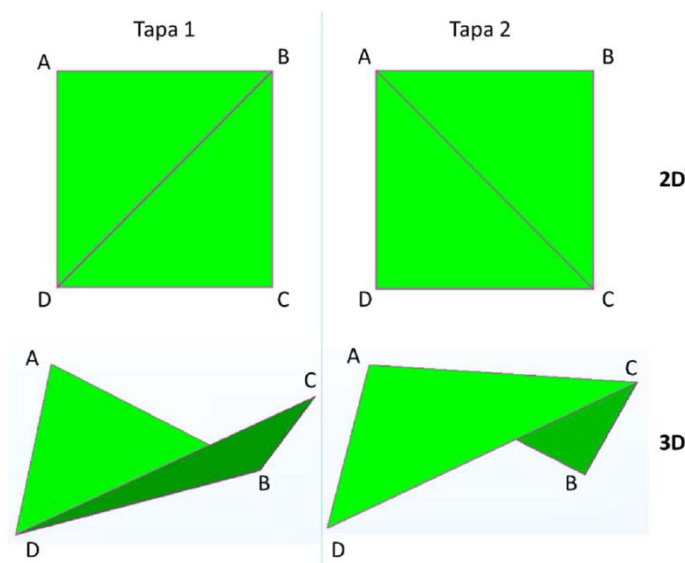
Kuvassa 23 on havainnollistus *Kuvan 20* eri pintojen mallinnustarkkuudesta. *Kuvasta 23* havaitaan, että tässä tapauksessa suunnitellut rakenteet ja maanpinta ovat hyvinkin tarkasti mallinnettuja, mutta mallin saven alapinta perustuu pohjatutkimuksiin, jotka ovat paikoin lähes 100 metrin päässä toisistaan.



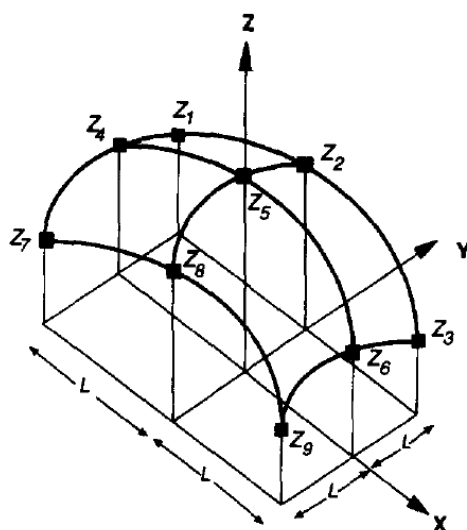
Kuva 23. Havainnollistus eroista pintamallien tarkkuudessa.

Tietomallintaminen itsessään ei ole pääasiallinen maakerrosrajojen epätarkkuuden aiheuttaja, vaan mahdollinen epätarkkuus johtuu suurimmaksi osaksi pohjatutkimusten määrästä. Sama epätarkkuus olisi läsnä myös perinteisesti 2D-poikkeileikkauksesta muodostetussa laskentamallissa. Tietomallintaminen ei myöskään poista suunnittelijan harkintaa (engl. "engineering judgement") laskentamallin muodostuksessa, koska maakerrosrajat pohjatutkimuspisteiden kohdalla ja pintamallin muodot ovat lopulta aina suunnittelijan tulkintaa. Usein malliin lisätäänkin pohjatutkimusalueen ulkopuolelle ja pohjatutkimusten väliin pisteitä, jotka eivät ole suoraan tutkimuspisteiden kohdalla. Nämä pisteet ovat puhtaasti pinnanmuotojen tulkintaa.

Pintojen kolmioinnin algoritmi vaikuttaa kuitenkin hieman pintamallien muotoon. Suurin osa mallintamisessa käytettävistä ohjelmistoista käyttää pintojen muodostamisessa lineaarista kolmiointia, jolloin esimerkiksi neljän pisteen perusteella muodostettu pinta ei ole aina yksiselitteisesti tietyn muotoinen. Tätä on havainnollistettu Kuvassa 24. Parempi tapa pinnan muodostamiseen pisteiden perusteella olisi tässä tapauksessa esimerkiksi niin kutsuttu kriging-menetelmä jossa pinnan z-koordinaatit lasketaan tunnetuista arvoista interpoloimalla. Pinnan muodostamista kriging-menetelmällä on havainnollistettu Kuvassa 25. (Jeong et al. 2005; Tanttu 2015, s. 54).



Kuva 24. Lineaarisen kolmioinnin eri tavat. (Tanttu 2015, s. 55).



Kuva 25. Periaatekuva pinnan muodostamisesta kriging-menetelmällä. (Odeh et al. 1995, s. 217).

Kuvan 24 eroavaisuuden merkitys eri kolmiointitapojen välillä pienenee, kun kolmioiden pisteet ovat lähekkäin, mikä yleensä ainakin maanpinnan osalta toteutuu. Suunniteltujen rakenteiden pinnat tulee tarkastaa siten, että malli vastaa suunniteltua. Saven alapinnan osalta vierekkäisten pisteiden z-koordinaatit harvoin poikkeavat toisistaan niin paljon, että kolmiointitavasta riippuva eroavaisuus olisi kovin merkittävä. Joissakin tapauksissa tämä voi kuitenkin aiheuttaa epätarkkuutta painumalaskentaan.

Tässä työssä toteutetussa painumalaskentamoottorissa oletetaan, että pinnat on mallinnettu kolmiopintoina, ja haetaan pintojen z-koordinaatteja kolmiopinnoilta niiden kärkipisteiden koordinaattien perusteella. Jos pintojen mallintaminen tulevaisuudessa muuttuu kohti muun tyyppisiä pintoja, tulee laskentamoottorin koodia muuttaa oleellisesti.

3.4 Mallin laadunvarmistus painumalaskentaa varten

Työssä toteutettu painumalaskentamoottori käyttää kolmiopintojen kolmioiden kärkipisteiden koordinaatteja laskentageometrian lähtötietona. Näin ollen mallinnusohjelmalla on hyvä tarkastaa, että laskentaan sisään luettavat pinnat ovat oikeanmuotoisia, eivätkä ne sisällä reikiä. Tämä sisältyy myös yleiseen tietomalliaineiston laadunvarmistusohjeistukseen. (Snellman 2015; Mäkinen et al. 2016).

Laskentamoottorissa itsessään on myös sisäänrakennettuna pintojen korjaus, mikäli pinnoissa havaitaan laskennassa puutteita tai ristiriitaisuuksia. Maanpintaa ei laskennassa tarkisteta, joten sen oikeellisuus on tarkistettava mallinnusohjelmalla. Laskennassa tehtävää pintojen korjausta on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.2.2. Laskentamoottorissa on myös sisäänrakennettuna toiminto, jossa laskentageometriaa voidaan tarkastella 3D-ikkunassa ennen varsinaista painumien laskentaa. Mallinnusohjelmalla on kuitenkin normaalin laadunvarmistuksen tapaan tarkistettava, että esimerkiksi rakenteen pinnan korot ja mitat ovat oikein ja maaperän rajapinnat ovat tulkitun kaltaiset.

4 Tietomallia hyödyntävä painumalaskentamoottori

4.1 Laskennan oletukset ja rajoitukset

Työssä toteutettiin MATLAB-ohjelmistoa käyttävä PINTAPAINUMA-painumalaskentamoottori (jatkossa PP), joka käyttää tietomallin Inframodel-pintojen koordinaattitietoja laskentamallin muodostamisessa. PP-moottorin painumalaskenta perustuu kokoonpuristuvuusindeksimenetelmään, jossa tarkastellaan vain pystysuuntaisia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Työssä toteutetulla versiolla on mahdollista laskea ainoastaan primaarisen konsolidaatiopainuman loppuarvoja. Laskentamoottorin MATLAB-koodi on esitetty Liitteessä 1.

Painumien laskennassa tehdään seuraavat oletukset:

1. Maapohjassa vallitsee 1D-muodonmuutostila, jossa tapahtuu vain pystysuuntaisia muodonmuutoksia. Vaakajännitykset eivät vaikuta maan muodonmuutoksiin.
2. Kuormitus lasketaan diskretoimalla 3D-pengerkuorma neliön muotoisiksi tasaisiksi kuormiksi ja edelleen pistekuormiksi neliöiden keskipisteisiin, kts. kappale 2.2.1. Kuorman aiheuttamien pystyjännityslisäysten otaksutaan noudattavan superpositioperiaatteella Boussinesqin pistekuormateoriaa, kaava (10), homogeeniselle elastiselle puoliavaruudelle sillä rajoituksella, että laskennallinen syvyys kustakin pistekuormasta on vähintään 1 m. Maan kerroksellisuuden ja jäykkyserojen ei oleteta vaikuttavan jännityksen jakaantumiseen.
3. Pohjavedenpinta sijaitsee laskennassa kuivakuorikerroksen alkuperäisessä alapinnassa ja sen taso ei muutu. Pohjavedenpinta voidaan mallintaa maanpinnan tasoon käyttämällä maanpintaa kuivakuorikerroksen alapintana.
4. Vierekkäisten maa-alkioiden (= laskentapisteiden) muodonmuutokset eivät vaikuta toisiinsa.
5. Rakennekerrosten edellyttämä alkuperäisen maanpinnan alapuolelle mahdollisesti tehtävä kaivu aiheuttaa maapohjaan vallitsevan pystyjännityksen ja konsolidaatiotilan muutoksen, joka lasketaan Boussinesqin pistekuormateorialla negatiivisina kuormina. Alkutilanteen konsolidaatiotila annetaan ylikonsolidaation (POP) arvona kussakin laskentapisteessä.
6. Saven alapinnan alapuolella oleva maakerros tai kallio ei painu.

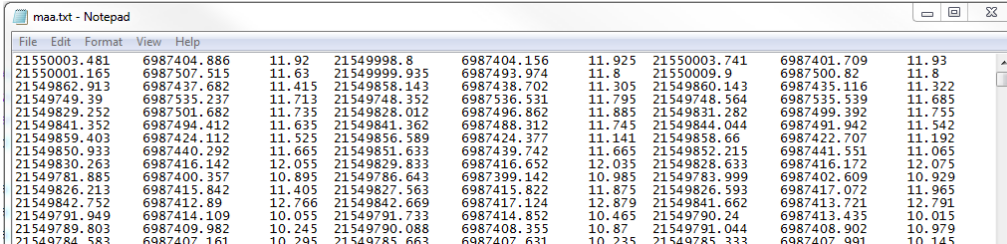
4.2 Laskentamoottorin toimintaperiaate

4.2.1 Lähtötiedot

Laskentamoottori on toteutettu MATLAB-koodina. Laskentaan luetaan sisään penkereen yläpinnan, maanpinnan, kevennysrakenteen yläpinnan, kaivupinnan, kuivakuoren alapinnan ja saven alapinnan kolmioiden koordinaattitiedot *.txt –tiedostoina. Koordinaattitiedoista muodostetaan ohjelmassa pintamatriisit, joita käytetään laskennassa kuormitus- ja maaperägeometrian lähtötietoina.

Maanpinnan tulee olla olemassa koko laskenta-alueella. Muiden pintojen tiedostot tulee olla olemassa samassa kansiossa moottorin ja sen funktioiden kanssa, mutta laskenta-alueella ei penkereen yläpintaa ja saven alapintaa lukuun ottamatta tarvitse sijaita kolmioita. Mikäli laskentatapauksessa ei ole esimerkiksi kaivupintaa, voidaan kaivupinnalle tehdä alla esitetyssä muodossa oleva *.txt –tiedosto, jossa on yksi kolmio laskenta-alueen ulkopuolella sijaitsevilla koordinaateilla. Tällöin ohjelma ei löydä laskenta-alueelta kaivupintaa ja käyttää maanpintaa kaivupintana, kts. kappale 4.2.2.

Pintojen *.txt –tiedostojen tulee olla muodossa, jossa riveinä on yhden kolmion kärkipisteiden koordinaatit $x_1, y_1, z_1, x_2, \dots, z_3$ (9 saraketta) vähintään yhdellä välilyönnillä erotettuina. Koordinaattien desimaalierottimena on piste. Alla (Kuva 26) on esitetty esimerkki oikeassa muodossa olevasta pintatiedostosta. Esimerkkitiedostossa on riveinä pinnan kunkin kolmion kärkipisteiden koordinaatit ETRS-GK21, N2000 –koordinaatistossa siten, että E vastaa x-akselia ja N vastaa y-akselia. Koelaskennat tehtiin kyseisessä koordinaatistossa.



21550003.481	6987404.886	11.92	21549998.8	6987404.156	11.925	21550003.741	6987401.709	11.93
21550001.165	6987507.515	11.63	21549999.935	6987493.974	11.8	21550009.9	6987500.82	11.8
21549862.913	6987437.682	11.415	21549858.143	6987438.702	11.305	21549860.143	6987435.116	11.322
21549749.39	6987535.237	11.713	21549748.352	6987536.531	11.795	21549748.564	6987535.539	11.685
21549829.252	6987501.682	11.735	21549828.012	6987496.862	11.885	21549831.282	6987499.392	11.755
21549841.352	6987494.412	11.635	21549841.362	6987488.312	11.745	21549844.044	6987491.942	11.542
21549859.403	6987424.112	11.525	21549856.589	6987424.377	11.141	21549858.66	6987422.707	11.192
21549850.933	6987440.292	11.665	21549851.633	6987439.742	11.665	21549852.215	6987441.551	11.065
21549830.263	6987416.142	12.055	21549829.833	6987416.652	12.035	21549828.633	6987416.172	12.075
21549781.885	6987400.357	10.895	21549786.643	6987399.142	10.985	21549783.999	6987402.609	10.929
21549826.213	6987415.842	11.405	21549827.563	6987415.822	11.875	21549826.593	6987417.072	11.965
21549842.752	6987412.89	12.766	21549842.669	6987417.124	12.879	21549841.662	6987413.721	12.791
21549791.949	6987414.109	10.055	21549791.733	6987414.852	10.465	21549790.24	6987413.435	10.015
21549789.803	6987409.982	10.245	21549790.088	6987408.355	10.87	21549791.044	6987408.902	10.979
21549784.583	6987407.161	10.295	21549785.663	6987407.631	10.235	21549785.333	6987407.991	10.145

Kuva 26. Esimerkki oikeassa muodossa olevasta pintatiedostosta.

Pintojen *.txt –tiedostot voidaan muodostaa esimerkiksi kopioimalla pintojen Infra-model-muodossa olevista .xml –tiedostoista pintojen kolmioiden tiedot ("Pnts" ja "Faces") MS Excel –taulukkolaskentaohjelmaan. Excel-ohjelmassa tiedot voidaan muokata oikeaan muotoon ja kopioida tekstitiedostoon. Työn yhteydessä toteutettiin laskentamoottoria varten valmis Excel-pohja, johon koordinaattitiedot voidaan kopioida, ja taulukko muuntaa tiedot automaattisesti oikeaan muotoon omalle välilehdelleen.

Pintojen koordinaattitietojen lisäksi laskentaan annetaan lähtötiedoiksi painumien laskenta-alueen ja kuormien laskentaan käytettävän alueen rajat sekä laskentapisteiden ja kuormapisteiden väliset etäisyydet. Lisäksi lähtötietona annetaan penger-materiaalin, kuivakuorisaven ja mahdollisen kevennysmateriaalin tilavuuspainot sekä saven tehokas tilavuuspaino.

Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän painumaparametrit C_c , C_r ja e_o annetaan erillisillä funktioilla. Alkutilanteen konsolidaatiotilan määritykseen käytetään ylikonsolidaation (POP) arvoa, ja se annetaan erillisellä funktiolla. Maaparametrien määrittämistä laskentaan on käsitelty tarkemmin luvussa 4.2.7, missä on esitetty myös kaaviokuvana, miten ja mihin funktioihin maaparametrit laskentamoottorissa syötetään.

4.2.2 Laskentapistematriisit

Painumien laskentaa varten muodostetaan laskentapistehila annetuilla minimi ja maksimi x- ja y-koordinaateilla sekä koordinaattiakselien suuntaisilla etäisyyksillä a_x ja a_y . Pistehilan minimi ja maksimi x- ja y-koordinaatit määräytyvät laskentamoottorissa oletusarvoisesti sisään luetun penkereen yläpinnan perusteella. Pistehilan minimi ja maksimi z-koordinaatit määräytyvät myös automaattisesti sisään luettujen pintojen perusteella. Ohjelmaan annetaan haluttu pisteiden pystysuuntainen etäisyys dz .

Laskentapistehilan perusteella muodostetaan 14 kpl kolmiulotteisia matriiseja, joihin laskennan tiedot tallentuvat. Pisteiden x-, y- ja z-koordinaatit tallentuvat koordinaatit sisältäviin vektoreihin (21).

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_m]^T \quad (21a)$$

$$\text{jossa } x_i - x_{i-1} = a_x \quad i = [2, 3, \dots, m]$$

$$\text{ja jossa } x_{\max} - a_x < x_m \leq x_{\max}$$

$$\mathbf{y} = [y_1 \quad y_2 \quad \cdots \quad y_n]^T \quad (21b)$$

$$\text{jossa } y_i - y_{i-1} = a_y \quad i = [2, 3, \dots, n]$$

$$\text{ja jossa } y_{\max} - a_y < y_n \leq y_{\max}$$

$$\mathbf{z} = [z_1 \quad z_2 \quad \cdots \quad z_k]^T \quad (21c)$$

$$\text{jossa } z_1 = z_{\max} - \frac{dz}{2}$$

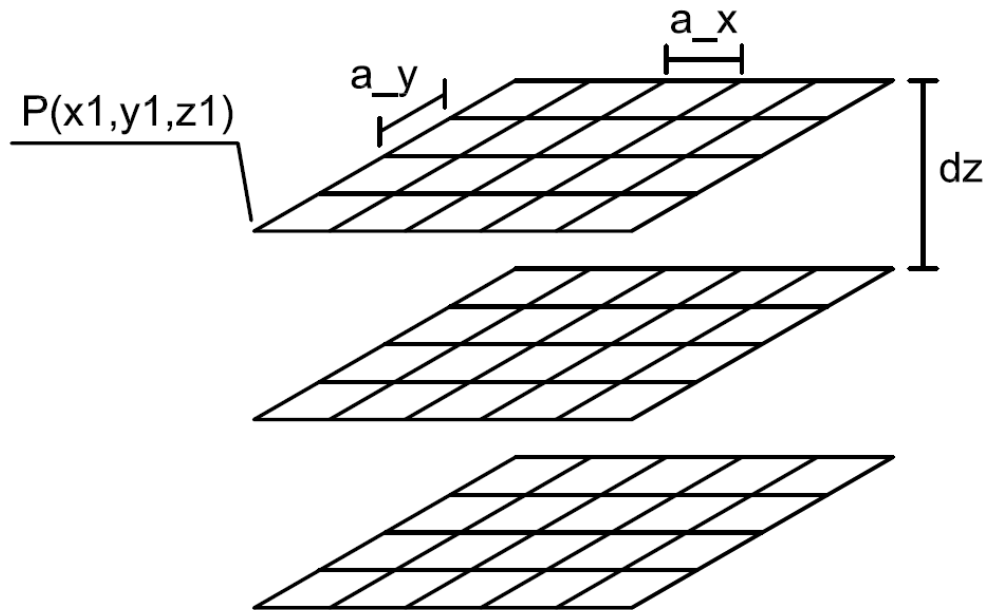
$$\text{ja jossa } z_i - z_{i-1} = -dz \quad i = [2, 3, \dots, k]$$

$$\text{ja jossa } z_{\min} \leq z_k < z_{\min} + dz$$

missä

x_1	on ohjelmaan annettu laskentapistehilan minimi x-koordinaatti
y_1	on ohjelmaan annettu laskentapistehilan minimi y-koordinaatti
x_{\max}	on ohjelmaan annettu laskentapistehilan maksimi x-koordinaatti
y_{\max}	on ohjelmaan annettu laskentapistehilan maksimi y-koordinaatti
a_x	on ohjelmaan annettu pisteiden etäisyys x-suunnassa
a_y	on ohjelmaan annettu pisteiden etäisyys y-suunnassa
z_{\max}	on sisään luetun maanpinnan maksimi z-koordinaatti pyöristettynä ylöspäin kokonaislukuun
z_{\min}	on sisään luetun saven alapinnan minimi z-koordinaatti pyöristettynä alaspäin kokonaislukuun
dz	on ohjelmaan annettu pisteiden etäisyys pystysuunnassa

Kuvassa 27 on havainnollistettu laskentapistematriisien muodostusta. Laskentapistematriisien sisältö on esitetty *Taulukossa 5*. Matriisin alkion arvo kuvaa kutakin suuretta kyseisessä laskentapisteessä.



Kuva 27. Laskentapistematriisin havainnollistus.

Taulukko 5. Laskentapistematriisien sisältö

Matriisi	Sisältö
P1	Penkereen yläpinnan z-koordinaatti pisteen kohdalla
P2	Maanpinnan z-koordinaatti "-"
P3	Kaivupinnan z-koordinaatti "-"
P4	Kuivakuoren alapinnan z-koordinaatti "-"
P5	Saven alapinnan z-koordinaatti "-"
P6	Vallitseva tehokas jännitys, σ'_0 [kPa]
P7	Ylikonsolidaatio, POP [kPa]
P8	Penkereen aiheuttama jännityslisäys, $\Delta\sigma$ [kPa]
P9	Kokoonpuristuvuusindeksi, C_c
P10	Luonnontilainen huokosluku, e_0
P11	Ylikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksi, C_r
P12	Esikonsolidaatiojännitys, $\sigma'_p = \sigma'_0 + \text{POP}$ [kPa]
P13	Vallitseva tehokas jännitys + jännityslisäys, $\sigma' = \sigma'_0 + \Delta\sigma$ [kPa]
P14	Kevennyksen yläpinnan z-koordinaatti pisteen kohdalla

Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän maaparametrimatriisien $P_9 \dots P_{11}$ alkioidelle annetaan arvot erillisillä funktioilla. Alkutilanteen konsolidaatiotila kussakin laskentapisteessä määritetään antamalla arvot kullekin POP-matriisin P_7 alkiolle erillisellä funktiolla.

Pintojen z-koordinaatit laskentapisteidien kohdalla, eli matriisien $\mathbf{P}_1 \dots \mathbf{P}_5$ ja \mathbf{P}_{14} alkiot lasketaan pisteiden x- ja y-koordinaattien perusteella pintamatriiseja käyttäen. Mikäli laskentapisteen kohdalta ei löydy pintaa eli piste sijaitsee kohdassa, joka ei ole x-y-tasossa yhdenkään kolmion sisällä, korjataan pintojen z-koordinaatit seuraavasti:

1. Jos laskentapisteen kohdalta ei löydy kaivupintaa, sen z-koordinaatti on sama kuin maanpinnalla ko. pisteessä.
2. Jos penkereen yläpintaa ei löydy, sen z-koordinaatti on sama kuin kaivupinnalla.
3. Jos kevennysrakenteen yläpintaa ei löydy, sen z-koordinaatti on sama kuin kaivupinnalla.
4. Jos kuivakuoren alapintaa ei löydy, sen z-koordinaatti on sama kuin maanpinnalla.
5. Jos saven alapintaa ei löydy, sen z-koordinaatti on sama kuin kuivakuoren alapinnalla.

Edellä esitetysti menetellään myös, mikäli pinnat ovat jossakin kohtaa pystysuunnassa väärässä järjestyksessä. Esimerkkinä tästä on, kun penkereen yläpinta on mallinnettu epätarkasti siten, että penkereen luiska leikkaa kaivupinnan ja on näin ollen joissakin kohdissa kaivupinnan alapuolella. Tällöin penkereen z-koordinaatti asetetaan samaksi kuin kaivupinnalla.

4.2.3 Vallitseva jännitys

Vallitseva jännitys laskentapisteissä lasketaan suoraan yläpuolella olevan maan painon avulla. Vallitsevan jännityksen matriisin \mathbf{P}_6 alkiot lasketaan kaavoilla (22) seuraavasti:

1. Kun laskentapiste on kuivakuoren alapinnan yläpuolella, käytetään kaavaa (22a).
2. Kun laskentapiste on kuivakuoren alapinnan alapuolella, käytetään kaavaa (22b).

$$\sigma'_0(x, y, z) = \gamma_{kk}[z_2(x, y) - z] \quad (22a)$$

$$\sigma'_0(x, y, z) = \gamma_{kk}[z_2(x, y) - z_4(x, y)] + \gamma'_{savi}[z_4(x, y) - z] \quad (22b)$$

missä

$\sigma'_0(x, y, z)$	on vallitseva jännitys laskentapisteessä (x,y,z) [kPa]
z	on laskentapisteen z-koordinaatti [m]
$z_2(x, y)$	on maanpinnan z-koordinaatti pisteen kohdalla [m]
$z_4(x, y)$	on kuivakuoren alapinnan z-koordinaatti ”-” [m]
γ_{kk}	on kuivakuorisaven tilavuuspaino [kN/m ³]
γ'_{savi}	on saven tehokas tilavuuspaino [kN/m ³]

Mikäli laskennassa on mukana kaivupinta, aiheuttaa kaivu vallitsevan jännityksen pienenemisen ja konsolidaatiotilan muutoksen. Vallitsevan jännityksen ja konsolidaatiotilan muutos lasketaan kappaleessa 4.2.5 esitetyllä tavalla ja vallitsevien jännitysten sekä ylikonsolidaation matriisit \mathbf{P}_6 ja \mathbf{P}_7 päivitetään vastaamaan muuttunutta tilannetta ennen pengerkuormasta aiheutuvien jännityslisäysten laskentaa.

4.2.4 Kuormamatriisit ja pengerkuorman diskretointi

Pengerkuorman diskretointia varten muodostetaan kuormahila. Ohjelmaan annetaan kuormien laskennan minimi ja maksimi x- ja y-koordinaatit sekä pistekuormien välinen etäisyys b . Oletusarvoisesti kuormahilan minimi ja maksimi x- ja y-koordinaatit määräytyvät sisään luetun penkereen yläpinnan perusteella. Kuormahila voidaan myös antaa eri parametreilla kuin laskentapistehila, eli voidaan esimerkiksi tarkastella pienemmän alueen painumia laajemmasta kuormituksesta. Kuormahilan perusteella muodostetaan 7 kpl kaksiulotteisia kuormamatriiseja, joiden sisältö on esitetty Taulukossa 6.

Taulukko 6. Kuormamatriisien sisältö

Matriisi	Sisältö
Q1	Penkereen yläpinnan z-koordinaatti kuormapisteen kohdalla
Q2	Maanpinnan z-koordinaatti "-"
Q4	Kuivakuoren alapinnan z-koordinaatti "-"
Q5	Saven alapinnan z-koordinaatti "-"
Q14	Kevennyksen yläpinnan z-koordinaatti "-"
Qz	Kuorman vaikutuspisteen (=kaivupinnan) z-koordinaatti
Qq	Kuorman suuruus [kN]

Kolmiulotteinen pengerkuorma muunnetaan laskennassa käytettyyn kaivupintaan vaikuttaviksi pistekuormiksi. Kuormat asetetaan laskennassa kuormahilan määrittämiin x, y -pisteisiin. Pengerkuorman diskretoinnin periaate on esitetty kappaleen 2.2.1 Kuvassa 12.

Pintojen z-koordinaatit kuormapisteen kohdalla haetaan pisteiden x- ja y-koordinaattien perusteella pintamatriiseja käyttäen. Kuormamatriisin Q_q alkiot eli pistekuormien suuruudet lasketaan pintojen z-koordinaattien välisten erotusten avulla kaavoilla (23) seuraavasti:

1. Kun kaivupinta kuormapisteen kohdalla on pohjavedenpinnan eli kuivakuoren alapinnan yläpuolella, käytetään kaavaa (23a).
2. Kun kaivupinta on pohjavedenpinnan alapuolella ja kevennyksen yläpinta on pohjavedenpinnan yläpuolella, käytetään kaavaa (23b).
3. Kun kaivupinta ja kevennyksen yläpinta ovat pohjavedenpinnan alapuolella, käytetään kaavaa (23c).

$$Q(x, y) = \{\gamma_p[z_1(x, y) - z_{14}(x, y)] + \gamma_{kev}[z_{14}(x, y) - z(x, y)]\} \cdot b^2 \quad (23a)$$

$$Q(x, y) = \{\gamma_p[z_1(x, y) - z_{14}(x, y)] + \gamma_{kev}[z_{14}(x, y) - z_4(x, y)]\} \cdot b^2 \quad (23b)$$

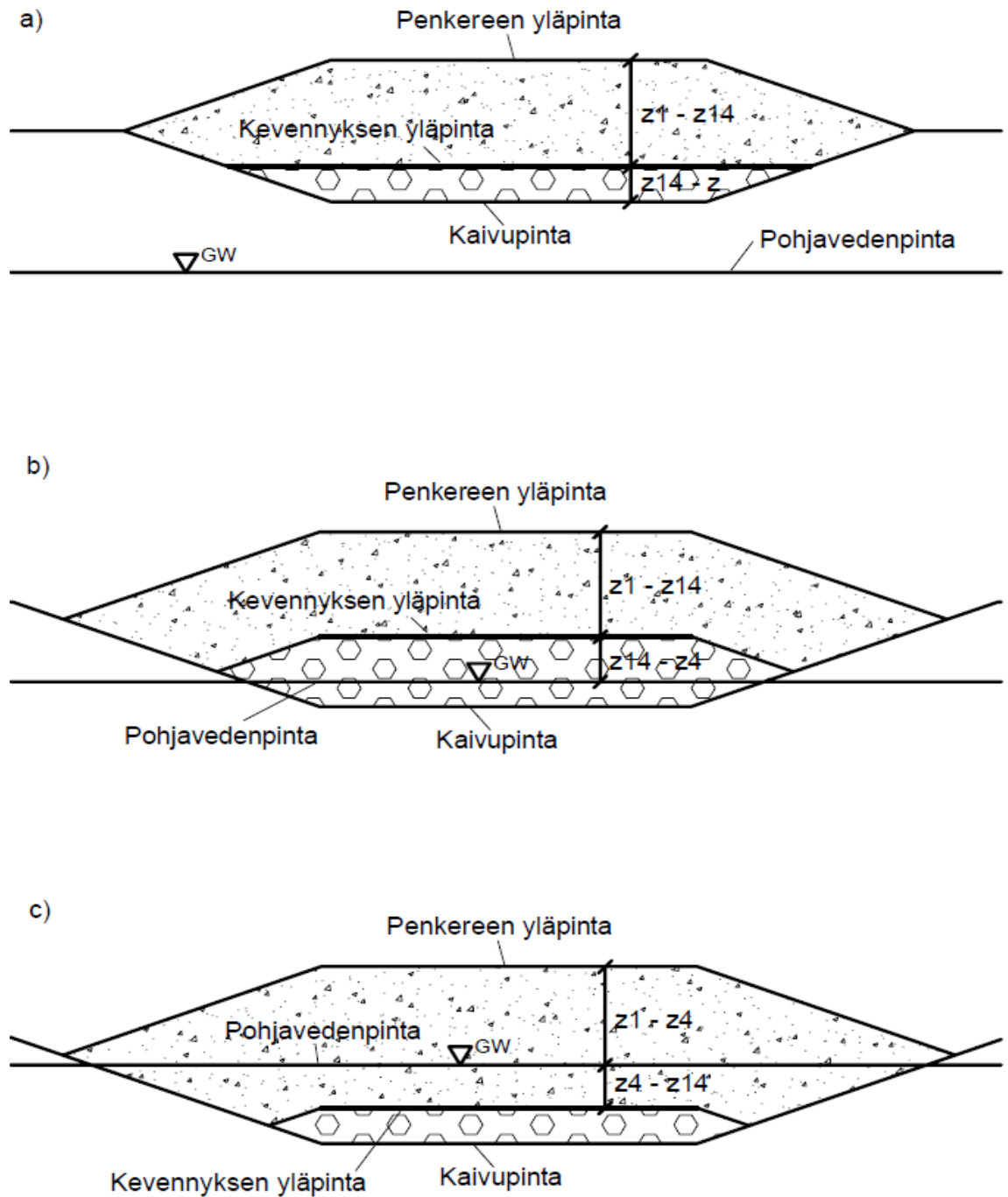
$$Q(x, y) = \{\gamma_p[z_1(x, y) - z_4(x, y)] + (\gamma_p - \gamma_w)[z_4(x, y) - z_{14}(x, y)]\} \cdot b^2 \quad (23c)$$

missä

$Q(x, y)$	on pistekuorma pisteessä x, y [kN]
$z_1(x, y)$	on penkereen yläpinnan z-koordinaatti pisteen kohdalla [m]
$z_{14}(x, y)$	on kevennyksen yläpinnan z-koordinaatti "- " [m]

$z(x, y)$	on kaivupinnan z-koordinaatti "-" [m]
$z_4(x, y)$	on kuivakuoren alapinnan z-koordinaatti "-" [m]
γ_p	on pengermateriaalin tilavuuspaino [kN/m ³]
γ_{kev}	on kevennysmateriaalin til.paino pohjaveden yläpuolella [kN/m ³]
γ_w	on veden tilavuuspaino = 10 kN/m ³
b	on pistekuormien välinen vaakasuuntainen etäisyys [m]

Kuormien laskennan eri tapauksia on havainnollistettu Kuvassa 28.



Kuva 28. Pistekuormien laskentatapaukset.

Kevennysrakenteen tehokkaan tilavuuspainon pohjaveden alapuolella oletetaan olevan nolla. Tämä pätee painumamitoituksessa käytettävien ohjearvojen mukaan ainakin kevytsoralle ja vaahtolasille, kun materiaalin oletetaan olevan pysyvästi veden alla (Liikennevirasto 2011).

Laskentamoottoriin on implementoitu optio laskennan suorittamiseksi siten, että huomioidaan kuormituksen muutos, kun maa-ainesta painuu pohjavedenpinnan alapuolelle. Tällöin pistekuormat eli kuormamatriisin \mathbf{Q}_q alkiot lasketaan inkrementaalisesti kaavoilla (24). Lopullinen painuman arvo on viimeisen kuormainkrementin lisäyksen jälkeen laskettu painuma.

$$S_0(x, y) = 0 \quad (24a)$$

$$Q_1(x, y) = \frac{Q(x, y)}{n} \quad (24b)$$

$$Q_i(x, y) = Q_{i-1}(x, y) + \frac{Q(x, y)}{n} - [S_{i-1}(x, y) - S_{i-2}(x, y)] \cdot b^2 \cdot \gamma_w \quad (24c)$$

$i = [2, 3, \dots, n]$

missä	S_i	on inkrementillä i laskettu painuma [m]
	Q_i	on pistekuorma inkrementillä i [kN]
	n	on laskentaan annettu inkrementtien lukumäärä

4.2.5 Jännityslisäysten laskenta

Yksittäisestä pistekuormasta aiheutuva jännitys lasketaan kussakin laskentapisteessä Boussinesqin pistekuormateorialla kappaleen 2.2.1 kaavalla (10). Koska pistekuormateoriassa pystyjännitys lähestyy ääretöntä, kun tarkastelusyvyys z lähestyy nollaa, on laskennassa käytetty tarkastelusyvyiden miniminä 1 metriä. Mikäli kuorman vaikutustaso eli z -koordinaatti sijaitsee laskentapisteen z -koordinaatin alapuolella, kyseisestä kuormasta ei laskennassa aiheudu pisteeseen jännityslisäystä.

Pengerkuormasta laskentapisteeseen aiheutuva jännityslisäys lasketaan kaikista kuormamatriisin \mathbf{Q}_q pistekuormista superpositioperiaatteella, kaava (25).

$$\Delta\sigma(x, y, z) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta\sigma_{ij}(x, y, z) \quad (25)$$

Missä	$\Delta\sigma(x, y, z)$	on pengerkuorman aiheuttama jännityslisäys pisteessä [kPa]
	$\Delta\sigma_{ij}(x, y, z)$	on pistekuorman i, j aiheuttama jännitys pisteessä [kPa]
	m	on pistekuormien lukumäärä x -akselin suunnassa [-]
	n	on pistekuormien lukumäärä y -akselin suunnassa [-]

Mahdollisesta kaivusta aiheutuva ylikonsolidaatio sekä vallitsevan jännityksen pieneneminen lasketaan samaan tapaan muuntamalla kaivumassat negatiivisiksi pistekuormiksi. Mikäli täyttö seuraa todellisuudessa kaivua välittömästi, yliarvioi tämä laskentatapa hieman kaivun vaikutusta jännityksiin, koska kyseinen laskentatapa vastaa avointa tilaa (Feda 1978, s. 41-43). Täytön seurattessa kaivua välittömästi jännityksen muutokset tapahtuvat todellisuudessa suljetussa tilassa, jolloin huokosveden virtausta ei tapahdu. Kaivun aiheuttamia jännitysmuutoksia on käsitelty tarkemmin kappaleissa 4.3.3 ja 4.3.4.

4.2.6 Painumien laskenta

Painumat lasketaan vain laskentapisteille, jotka ovat kaivupinnan ja saven alapinnan välissä. Muiden pisteiden painumien nollaus tehdään etsimällä laskentapistematriiseista pisteet, jotka ovat kaivupinnan yläpuolella tai saven alapinnan alapuolella, ja asettamalla kyseisten pisteiden painumaparametrit C_c ja C_r nolllaksi.

Laskentapisteiden muodonmuutokset lasketaan normaali- ja ylikonsolidoituneelle osalle erikseen. Pisteiden ylikonsolidoituneen osan muodonmuutokset lasketaan kaavoilla (26) ja normaalikonsolidoituneen osan muodonmuutokset kaavoilla (27).

$$\varepsilon_{YK}(x, y, z) = \frac{C_r(x, y, z)}{1 + e_0(x, y, z)} \log \left(\frac{\sigma'(x, y, z)}{\sigma'_0(x, y, z)} \right) \quad \text{kun } \sigma'(x, y, z) \leq \sigma'_p(x, y, z) \quad (26a)$$

$$\varepsilon_{YK}(x, y, z) = \frac{C_r(x, y, z)}{1 + e_0(x, y, z)} \log \left(\frac{\sigma'_p(x, y, z)}{\sigma'_0(x, y, z)} \right) \quad \text{kun } \sigma'(x, y, z) > \sigma'_p(x, y, z) \quad (26b)$$

$$\varepsilon_{NK}(x, y, z) = 0 \quad \text{kun } \sigma'(x, y, z) \leq \sigma'_p(x, y, z) \quad (27a)$$

$$\varepsilon_{NK}(x, y, z) = \frac{C_c(x, y, z)}{1 + e_0(x, y, z)} \log \left(\frac{\sigma'(x, y, z)}{\sigma'_p(x, y, z)} \right) \quad \text{kun } \sigma'(x, y, z) > \sigma'_p(x, y, z) \quad (27a)$$

missä $\sigma'(x, y, z) = \sigma'_0(x, y, z) + \Delta\sigma(x, y, z)$ on jännitys kuorman alaisena [kPa]

Kunkin laskentapisteen painuma lasketaan kaavalla (28).

$$S(x, y, z) = [\varepsilon_{YK}(x, y, z) + \varepsilon_{NK}(x, y, z)] \cdot dz \quad (28)$$

Primaarisen konsolidaatiopainuman loppuarvot lasketaan summaamalla kussakin x- ja y –kohdassa olevien laskentapisteiden painumien arvot, kaava (29).

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^k S(x, y, z_i) \quad (29)$$

missä $S(x, y)$ on painuma pisteessä x, y [m]
 k on laskentapisteiden lukumäärä syvyys suunnassa

Lopputuloksena saadaan painumamatriisi **S** (30), joka sisältää painuman arvot laskentapistehilan määrittämällä x- ja y-koordinaateilla. Painumien x- ja y-koordinaatit ovat tallentuneena laskentapistehilan määrittämisessä muodostettuihin koordinaattivektoreihin (21).

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{x_1y_1} & S_{x_1y_2} & \cdots & S_{x_1y_n} \\ S_{x_2y_1} & S_{x_2y_2} & \cdots & S_{x_2y_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{x_my_1} & S_{x_my_2} & \cdots & S_{x_my_n} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Painumien arvot vähennetään lopuksi kunkin x, y-kohdan penkereen pinnan z-koordinaatista, jolloin saadaan matriisi, joka sisältää painuneen penkereen z-koordinaatit. Tämän matriisin, sekä x- ja y-koordinaattivektorien avulla muodostetaan painuneen pinnan pisteistä matriisi, jossa riveinä on kunkin pisteen x-, y- ja z-koordinaatit. Matriisi kirjoitetaan moottorista ulos .txt-tiedostona. Tiedosto sisältää pisteitä kohdista, joissa penkereen yläpintaa ei löydy. Näillä pisteillä z-koordinaatti on

$z = 9999$ – *painuma*. Karsimalla kyseiset pisteet pois ja tiedostoa muokkaamalla pisteet voidaan edelleen lukea tietomalliin ja muodostaa pisteistä kolmiopinta. Tämä pinta kuvaa painunutta pengertä, kun primaarinen konsolidaatio on päättynyt.

4.2.7 Monte Carlo –simulointi

Oletusarvoisesti laskentamoottorissa laskenta tehdään yksiarvoisilla parametreilla, jolloin tuloksena saadaan yksittäiset painumakuvaajat. Vaihtoehtoisesti laskenta voidaan tehdä Monte Carlo –simuloinnilla suorittamalla laskenta useaan otteeseen antamalla parametreille jakaumat ja niiden tunnusluvut. Tällöin laskennassa varioidaan parametreja annettujen jakaumien mukaisesti ja laskentatulosteena saadaan oletusarvoisesti laskennan maksimipainuman histogrammi, johon on merkitty laskettujen painumien keskiarvo sekä 5 % ja 95 % fraktilit. Samanlainen histogrammi voidaan tulostaa myös laskentapistehilan minkä tahansa x , y -pisteen lasketuista painumista. Monte Carlo –simulointia varten laskentamoottoriin annetaan simulointien lukumäärä n sekä valinnat, joilla määritetään mitä parametreja varioidaan. Monte Carlo –simuloinnin yhteydessä ei moottorissa voida laskea kappaleessa 4.2.4 esitettyä nosteen aiheuttamaa kuormituksen pienenemistä.

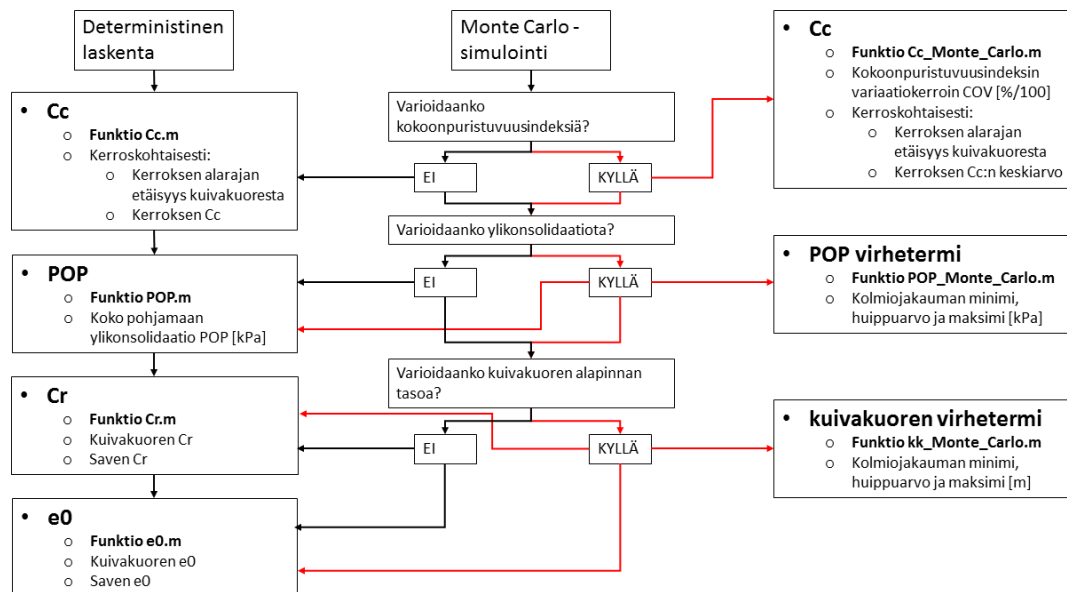
Laskentamoottoriin implementoitiin tässä työssä kokoonpuristuvuusindeksin C_c kerroksittainen variointi, koko pohjamaan ylikonsolidaation variointi sekä kuivakuoren alapinnan variointi. Laskenta voidaan tehdä joko varioimalla kutakin erikseen tai kahta tai kaikkia edellä esitetyistä yhtäaikaaisesti. Tässä työssä luotiin parametreille variointifunktiot seuraavasti:

- kokoonpuristuvuusindeksi C_c
 - kerroksittainen log-normaalijakauma
 - lähtötietona kerroksen alarajan etäisyys kuivakuoren alapinnasta, kokoonpuristuvuusindeksin keskiarvo sekä variaatiokerroin COV
- ylikonsolidaatio POP
 - vakio + virhetermi, joka noudattaa kolmiojakaumaa
 - lähtötietona vakioarvo sekä virhetermin kolmiojakauman minimi, huippuarvo ja maksimi
- kuivakuoren alapinta (= pohjavedenpinta)
 - sisään luetun kuivakuoren alapinnan malli + virhetermi, joka noudattaa kolmiojakaumaa
 - lähtötietona virhetermin kolmiojakauman minimi, huippuarvo ja maksimi

Kuivakuoren alapinnan variointia voidaan moottorissa käyttää vain tilanteessa, jossa kuivakuoren alapinta on kaivupinnan alapuolella. Tällöinkin tulee varmistaa, ettei kuivakuoren variointin jakauma tuota arvoja, joilla kuivakuoren alapinta on kuormituksen kohdalla kaivupinnan yläpuolella, sillä kuormat lasketaan moottorissa vain kertaalleen ennen kuivakuoren alapinnan variointia.

Työssä luodut parametrien variointifunktiot ovat Liitteenä 2. Myös muunlaisten jakaumien luominen on mahdollista muuttamalla variointifunktioiden tuottamia jakaumia. Parametrien antamiseen käytettyjä funktioita on havainnollistettu *Kuvassa 29*.

Monte Carlo –simuloinnin tapauksessa painumamatriisi **S** on kolmiulotteinen siten, että kullakin simulointikerralla laskettu kaksiulotteinen painumamatriisi **S_i** tallennetaan omalle ”tasolleen” matriisissa **S**. Kolmiulotteisesta painumamatriisista voidaan edelleen kerätä minkä tahansa x, y-kohdan laskentapisteen kullakin simulaatiokerralla lasketut painumat, ja tulostaa lasketuista painumista histogrammi. Lisäksi voidaan esimerkiksi laskea kullakin simulointikerralla minkä tahansa kahden pisteen välinen painumaero, ja muodostaa datasta histogrammi ja laskea tilastollisia tunnuslukuja.



Kuva 29. Kaaviokuva maaparametrien antamisesta PP-moottorissa.

4.3 Laskentamoottorin validointi

4.3.1 Yleistä

Työssä kehitetyn PP-laskentamoottorin laskennallista oikeellisuutta tarkasteltiin vertailemalla testilaskelmilla saatuja tuloksia GeoCalcilla sekä PLAXIS 2D -laskenta-ohjelmalla saatuihin tuloksiin. Testilaskelmista tarkasteltiin laskettujen painumien lisäksi myös muita PP-moottorilla laskettuja suureita, kuten jännityslisäyksiä ja muodonmuutoksia poikkileikkauksessa. Testilaskelmissa käytettyjen pintatiedostojen sisältö on esitetty Liitteessä 3.

Tulosten vertailuun käytetyissä laskentaohjelmissa laskentamalli on kaksiulotteinen ja mallin geometrian oletetaan jatkuvan äärettömästi leikkausta vastaan kohtisuorassa suunnassa. Tulosten vertailukelpoisuuden vuoksi testilaskelmat PP-moottorilla suoritettiin siten, että pengeri ja maakerrokset mallinnettiin riittävän laajoina, jotta kuormituksen kolmiulotteisuus ei vaikuta merkittävästi tuloksiin.

GeoCalcin käyttämällä SETTLE-painumalaskentamoottorilla kokoonpuristuvuusindeksimenetelmällä laskettaessa ohjelma muuntaa painumaparametrit vastaamaan tangenttimoduulimenetelmän parametreja kappaleen 2.1.3 kaavalla (6) ja käyttää laskennassa jännitysekspONENTIN arvoa $\beta=0$. Painumat lasketaan muunnetuilla parametreilla tangenttimoduulimenetelmällä. (Vepsäläinen ja Takala 2004).

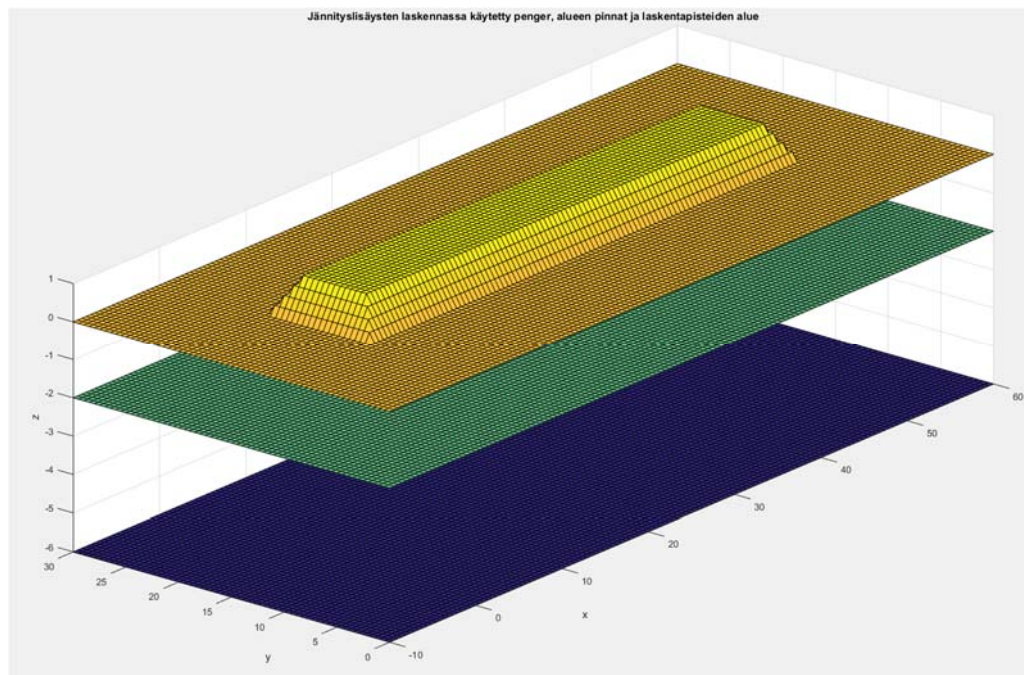
Kun kaivupintaa ei ole, tulisi GeoCalcin SETTLE-moottorilla sekä PP-moottorilla laskettujen avoimen tilan painumien vastata toisiaan, kun PP-moottorin kuormituksen kolmiulotteisuus ei vaikuta, koska kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä vastaa tangenttimoduulimenetelmää jännityseksponentilla $\beta=0$. Avoimessa tilassa laskennallisena erona näiden kahden laskentamoottorin välillä on ainoastaan jännityslisäysten laskentaperiaate. Kun laskelmissa on mukana kaivupinta, joudutaan kaivusta aiheutuva ylikonsolidaatio ja vallitsevan jännityksen muutos mallintamaan GeoCalc:lla erikseen, jolloin laskelmat eivät välttämättä täysin vastaa toisiaan.

Työssä kehitetty PP-moottori sekä GeoCalcin käyttämä SETTLE-moottori perustuvat klassiseen maamekaniikkaan ja yksiulotteisiin muodonmuutoksiin. PLAXIS 2D-ohjelma sen sijaan perustuu elementtimenetelmään ja ohjelmalla tehdyissä laskelmissa oletetaan, että maassa vallitsee tasomuodonmuutostila (PLAXIS 2016b). Kappaleessa 4.1 esitetyistä PP-moottorin laskennan oletuksista on PLAXIS 2D -laskennassa sellaisenaan voimassa ainoastaan kohta 6, kun laskentamalli muodostetaan siten, että saven alapinnan pisteet eivät siirry pystysuunnassa. Näin ollen PP-moottorilla ja PLAXIS 2D -ohjelmalla tehdyt laskelmat eivät ole laskennallisesti täysin vertailukelpoisia. Tästä johtuen PP-moottorin validointia varten tarkasteltiin PLAXIS 2D -ohjelmalla ainoastaan tulosten suuruusluokkaa.

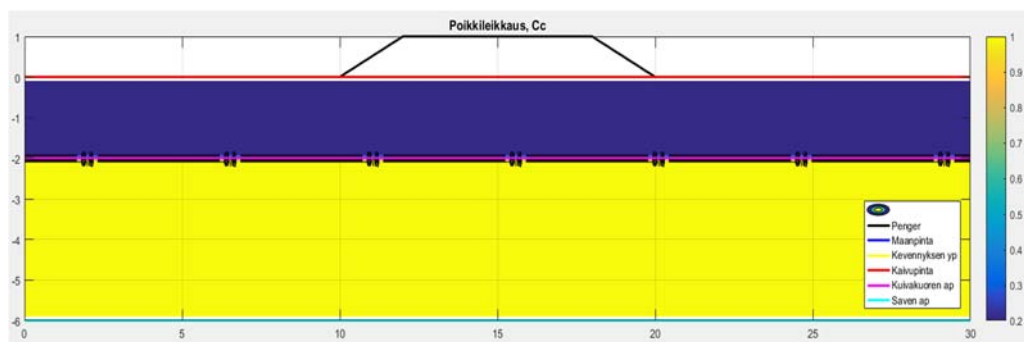
4.3.2 Testilaskenta 1: vaakasuorat pinnat

Ensimmäisessä testilaskennassa testattiin laskentamoottorin toimintaa yksinkertaisella geometrialla, jossa maakerrosrajat ovat vaakasuoria. Vertailussa tarkasteltiin muilla ohjelmilla samoilla maaparametreilla ja geometrialla saatuja tuloksia. Testilaskennan 1 geometria on esitetty *Kuvissa 30 ja 31*. Pohjavedenpinta sijaitsee laskennassa kuivakuorikerroksen alapinnassa tasossa -2,0. Laskennassa käytetyt maaparametrit on esitetty *Taulukossa 7*.

PP-moottorilla laskettujen painumien tasa-arvokäyrät on esitetty *Kuvassa 32*. Tasa-arvokäyrien perusteella voidaan todeta, että laskennassa käytetty geometria on riittävän laaja, jotta poikkileikkaus x-akselin puolivälistä vastaa 2D-poikkileikkauslaskentaa.



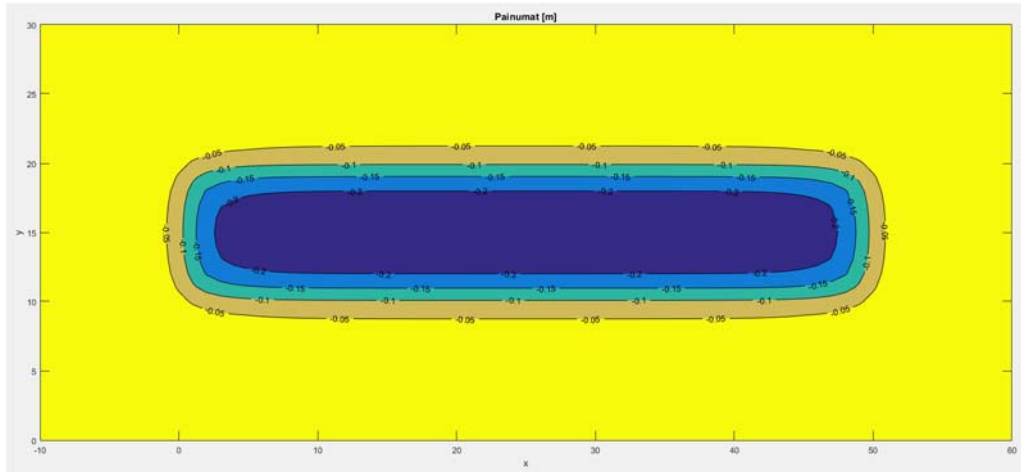
Kuva 30. Geometria testilaskennassa 1 PP –moottorilla.



Kuva 31. Poikkileikkaus penkereen puolivälistä, $x=25\text{m}$. C_c :n arvot.

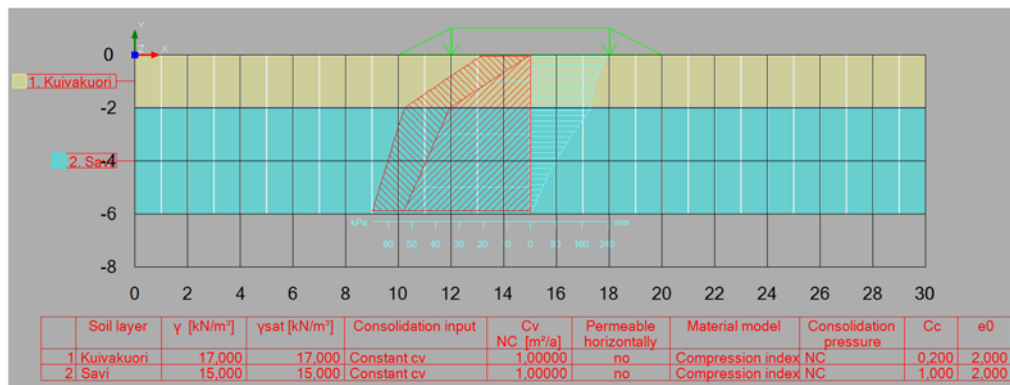
Taulukko 7. Maaparametrit testilaskennassa 1

Kerros	h [m]	γ [kN/m ³]	C_c	C_r	e_0	POP [kPa]
Penger	1	20	-	-	-	-
Kuivakuori	2	17	0,2	0,1	2	0
Savi	4	15	1	0,1	2	0

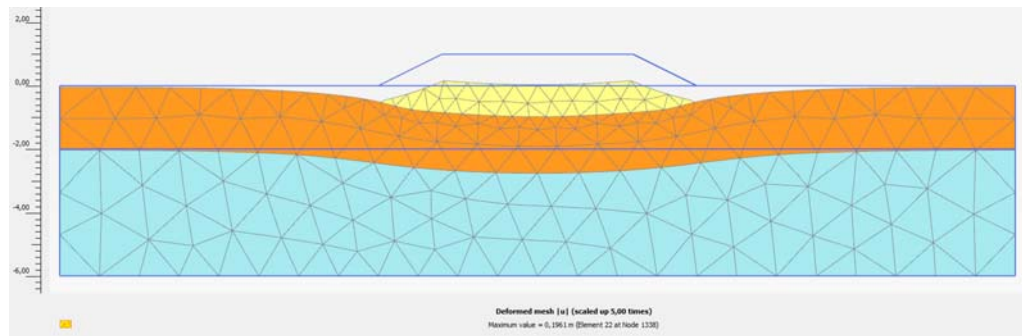


Kuva 32. Painumien tasa-arvokäyrät.

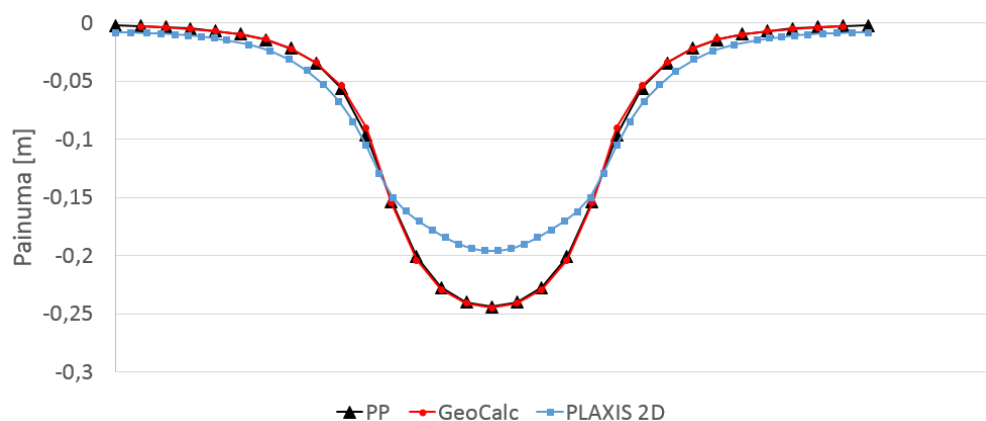
Testilaskentaa 1 vastaava geometria GeoCalcilla on esitetty Kuvassa 33, ja PLAXIS 2D:n geometria konsolidaation lopussa Kuvassa 34. PP-moottorilla, GeoCalcilla sekä PLAXIS 2D:llä lasketut painumakuvaajat poikkileikkauksessa penkereen keskellä on esitetty Kuvassa 35. Kuvasta 35 havaitaan, että GeoCalcilla ja PP:n painumakuvaajat ovat lähes identtisiä, ja PLAXIS 2D:llä lasketut painumat ovat hieman pienempiä. GeoCalcilla laskettu maksimipainuma on 0,245 m ja PP-moottorin vastaava on 0,244 m. Pieni ero lasketuissa painumissa johtuu jännityslisäysten laskenta-periaatteesta sekä laskentapisteen sijainnista aiheutuvista eroista jännityslisäys- ja muodonmuutosjakaumissa (ks. Kuva 36).



Kuva 33. Geometria testilaskennassa 1 GeoCalcilla.

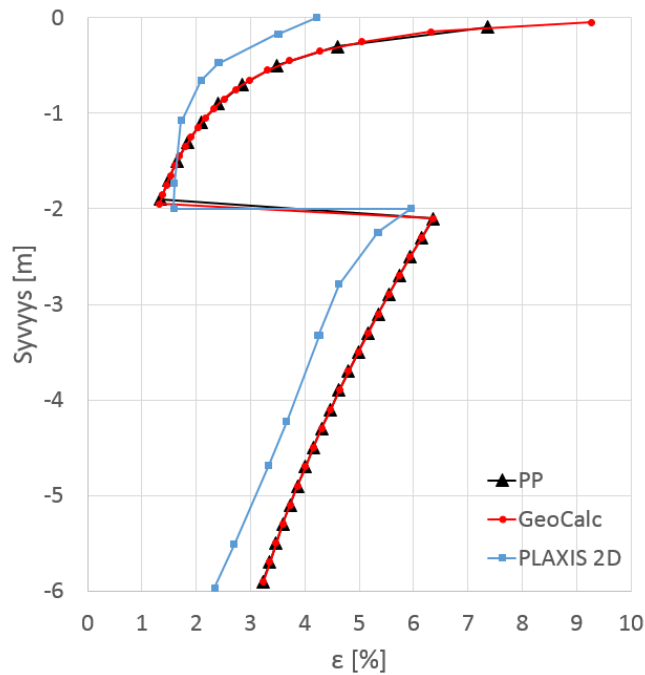


Kuva 34. PLAXIS 2D:n geometria konsolidaation lopussa. Huom. siirtymät skaalattu viisinkertaisiksi.



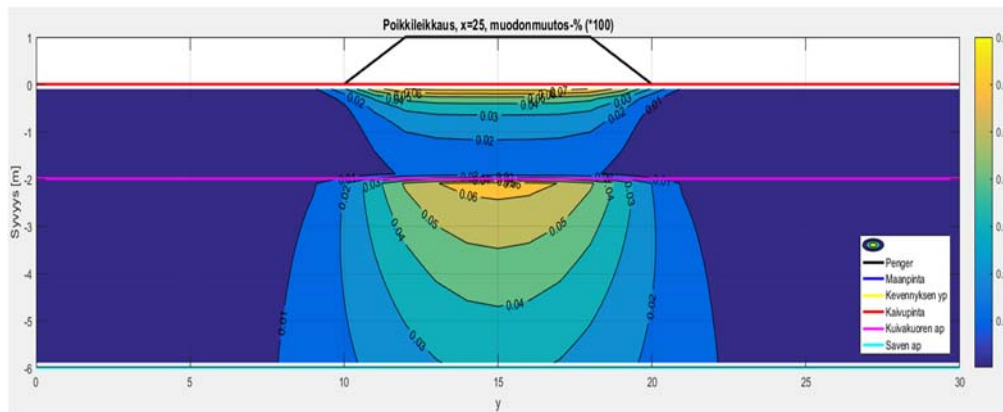
Kuva 35. Poikkileikkauksen painumakuvaajat eri ohjelmilla laskettuna.

Kuvassa 36 on esitetty pystysuuntaiset muodonmuutokset penkereen keskipisteessä syvyyden funktiona eri ohjelmilla laskettuna. Kuvasta 36 havaitaan, että GeoCalcin ja PP:n muodonmuutoskuvaajat vastaavat lähes täydellisesti toisiaan. Erona kuvaajissa on, että GeoCalc-laskennassa on aivan maanpinnan läheisyyteen sijoitettu laskentapiste, jonka laskettu muodonmuutos on yli 9 %. PP-moottorissa ylin laskentapiste sijaitsee alempana, ja näin ollen laskennan suurin muodonmuutos on hieman tätä pienempi. Laskentapisteiden syvyysuuntaisesta sijoittelusta aiheutuva ero lasketuissa painumissa on kuitenkin mitättömän pieni, kun laskentapisteiden syvyysuuntainen etäisyys on pieni. PLAXIS 2D:llä lasketut muodonmuutokset ovat muita ohjelmia hieman pienempiä.

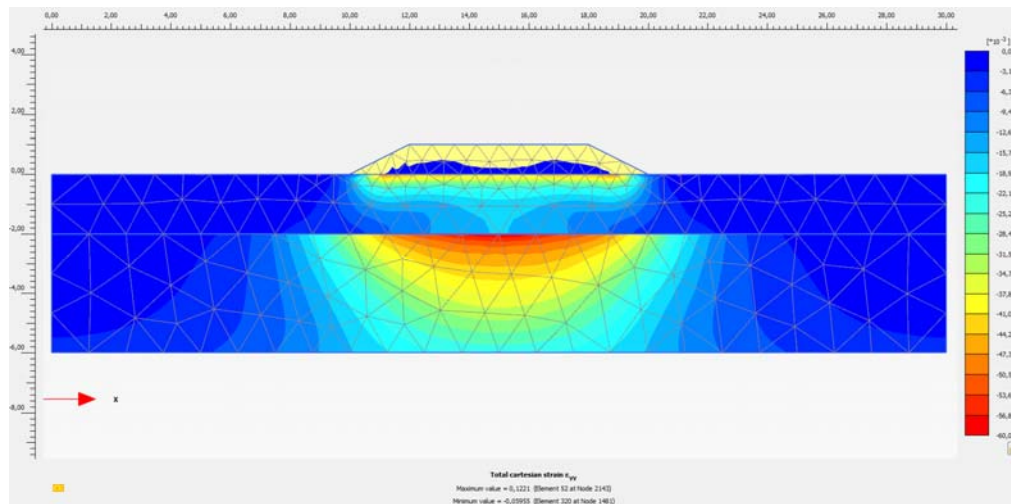


Kuva 36. Muodonmuutokset penkerein keskipisteen alapuolella eri ohjelmilla laskettuna.

PP-moottorilla lasketut muodonmuutokset poikkileikkauksessa on esitetty Kuvassa 37. Vastaava kuvaaja PLAXIS 2D -ohjelmalla laskettuna on esitetty Kuvassa 38. Plaxis 2D -laskennassa käytetyt parametrit on esitetty Taulukossa 8. GeoCalc-ohjelmasta ei ole mahdollista saada tämän tyyppistä kuvaajaa laskentatulosteena.



Kuva 37. Pystymuodonmuutokset, poikkileikkaus penkerein keskeltä PINTA-PAINUMA-moottorilla laskettuna.



Kuva 38. Pystymuodonmuutokset PLAXIS 2D –ohjelmalla laskettuna.

Taulukko 8. PLAXIS 2D –laskennan materiaaliparametrit

Kerros	Materiaalimalli	γ [kN/m ³]	E [kN/m ²]	c [kPa]	ϕ [°]	Cc	Cr	e_o
Penger	Mohr-Coulomb	20	50 000	1	40	-	-	-
Kuivakuori	Soft soil	17	-	10	30	0,2	0,05	2
Savi	Soft soil	15	-	5	10	1	0,1	2

Kuvia 37 ja 38 vertaamalla havaitaan, että PLAXIS 2D -laskennan savikerroksen pystymuodonmuutokset ovat hieman PP-moottorilla laskettuja pienempiä, mikä johtuu osittain siitä, että FEM-laskennassa huomioidaan automaattisesti eri kerrosten jäykkyyserojen vaikutus jännityksen jakautumiseen. FEM-laskennassa huomioidaan myös vaakajännitykset ja -muodonmuutokset, mikä vaikuttaa myös pystysuuntaisiin muodonmuutoksiin. Pystymuodonmuutosjakauman muoto on kuitenkin hyvin samanlainen.

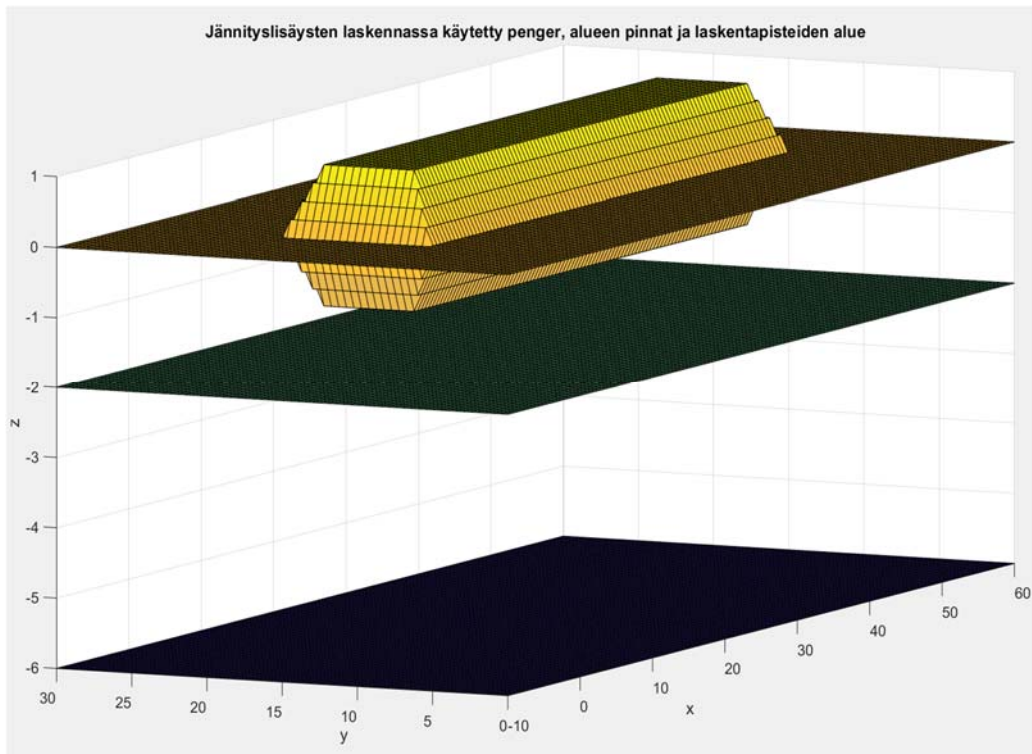
Testilaskennan 1 perusteella voidaan todeta, että yksinkertaisella geometrialla PP-moottori antaa primaarikonsolidaation loppuarvoille lähes täysin samoja tuloksia GeoCalcin SETTLE-moottorin kanssa, kun kuormitus sekä maaperägeometria pysyvät muuttumattomina riittävän laajalla alueella. FEM-laskennalla painumien arvot ovat sekä PP-moottorilla että GeoCalc:lla laskettuja hieman pienempiä. Eri ohjelmilla lasketut maksimipainumat on esitetty Taulukossa 9.

Taulukko 9. Testilaskennan 1 maksimipainumat eri ohjelmilla

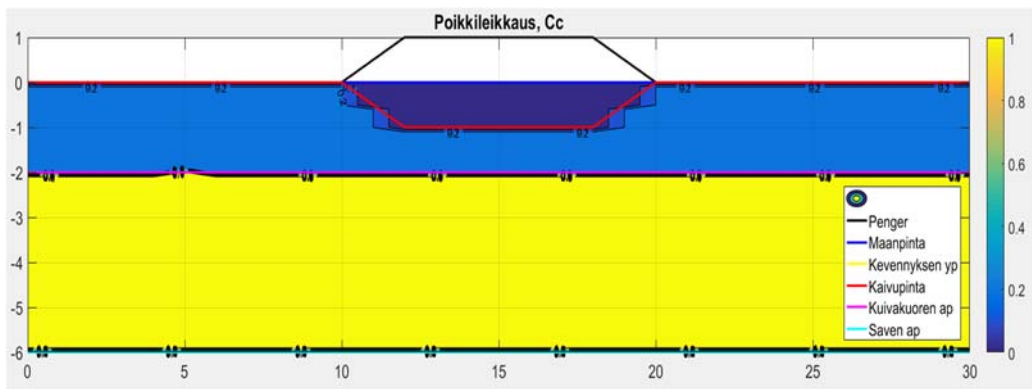
Ohjelma	Maks. painuma [m]
PP	0,245
GeoCalc	0,244
PLAXIS 2D	0,196

4.3.3 Testilaskenta 2: kaivupinta

Testilaskennassa 2 testattiin laskentamoottorin toimintaa, kun laskennassa on mukana penkereen alle tehtävä kaivupinta. Laskennan geometria on muutoin yhtenevä testilaskennan 1 kanssa, mutta tässä laskennassa penkereen alta poistetaan ensin 1 m paksuudelta olemassa olevaa kuivakuorikerrosta. Testilaskennan 2 geometria PP-moottorilla on esitetty *Kuvissa 39 ja 40*.

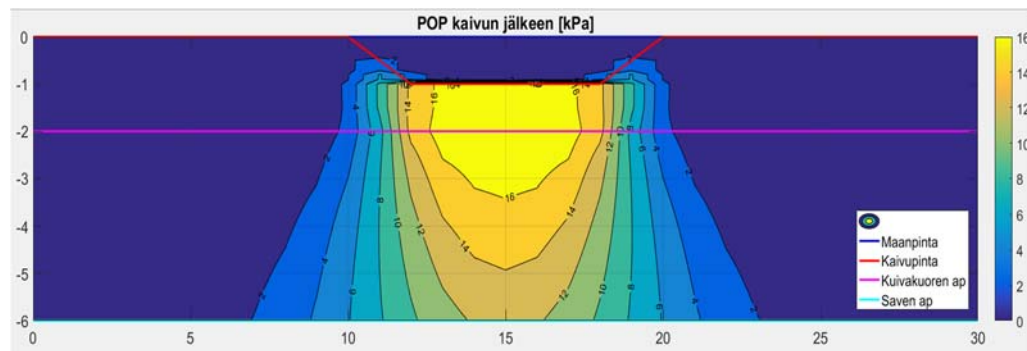


Kuva 39. 3D-geometria testilaskennassa 3.

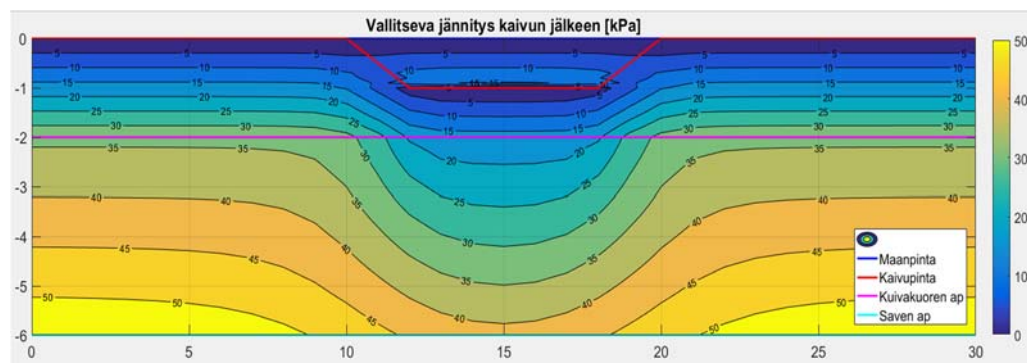


Kuva 40. Poikkileikkausgeometria testilaskennassa 3.

Kuivakuorikerrokseen tehtävä kaivu aiheuttaa maapohjaan vallitsevan pystyjännityksen sekä konsolidaatitilan muutoksen. Tämä lasketaan PP-moottorilla Boussinesqin pistekuormateorialla negatiivisina kuormina. PP-moottorilla laskettu ylikonsolidaation kasvu on esitetty Kuvassa 41. Kaivun aiheuttama muutos vallitseviin pystyjännityksiin vähennetään PP-moottorissa alkutilanteen vallitsevista jännityksistä. Moottorilla lasketut kaivun jälkeiset tehokkaat pystyjännitykset poikkileikkauksessa on esitetty Kuvassa 42.

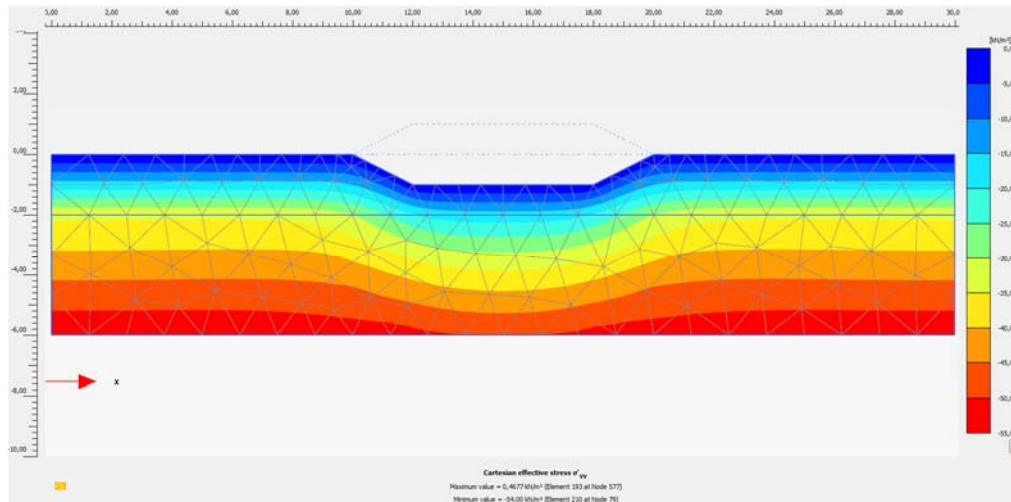


Kuva 41. Kaivusta aiheutuva ylikonsolidaatio poikkileikkauksessa Boussinesqin pistekuormateorialla laskettuna

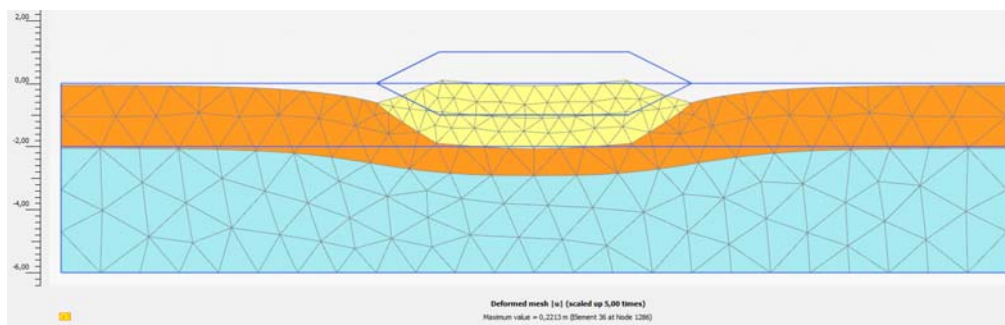


Kuva 42. Vallitseva tehokas jännitys poikkileikkauksessa kaivun jälkeen. Huom. kaivupinnan yläpuolisilla jännityksillä ei ole laskennassa merkitystä, sillä ko. pisteiden C_c ja C_r ovat nollia.

PLAXIS 2D-ohjelmalla kaivu voidaan mallintaa omana laskentavaiheenaan. Kuvassa 43 on esitetty kaivun jälkeiset tehokkaat pystyjännitykset kaivun jälkeen PLAXIS 2D -ohjelmalla laskettuna. Jännitykset on laskettu PLAXIS 2D -ohjelman ”consolidation” -laskentatyypillä, jolloin tehokkaat jännitykset riippuvat ajasta sekä savi-kerroksen vedenjohtavuudesta. Laskelmassa saven vedenjohtavuudeksi asetettiin 0,001 m/d ja konsolidaatioajaksi 10 päivää. Kuvan 43 jännitykset kuvaavat näin ollen tehokkaita pystyjännityksiä 10 päivän kuluttua kaivusta. Kuvassa 44 on esitetty laskelman lopulliset siirtymät. Siirtymät on nollattu ennen penkereen aktivointia, jolloin siirtymissä ei ole mukana kaivun aiheuttamia siirtymiä.



Kuva 43. Tehokkaat pystyjännitykset 10 päivää kaivun jälkeen PLAXIS 2D-ohjelmalla.

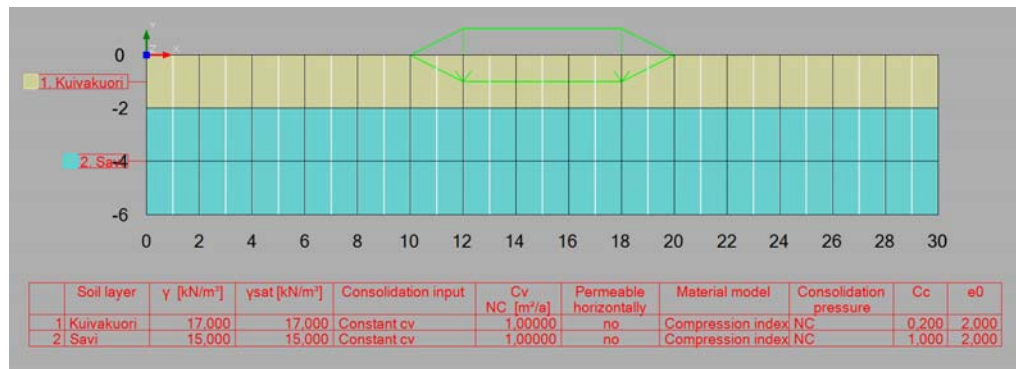


Kuva 44. PLAXIS 2D-laskelman siirtymät konsolidaation lopussa. Siirtymät skaalattu viisinkertaisiksi.

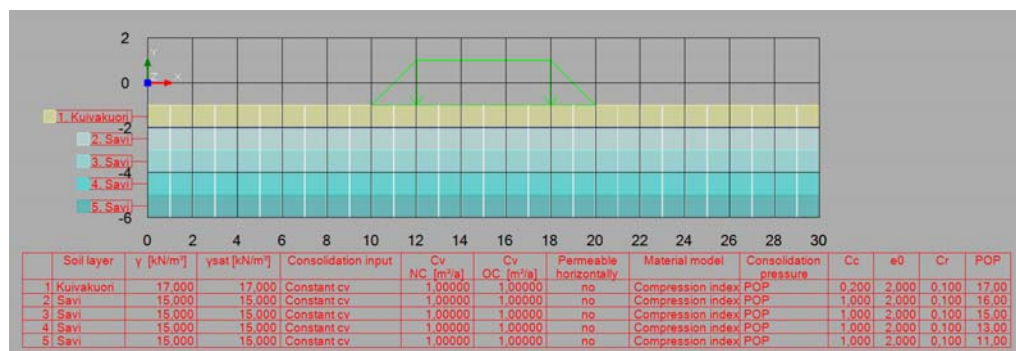
Kuvista 42 ja 43 havaitaan, että PP-moottorilla laskettu kaivun jälkeinen tehokkaan vallitsevan pystyjännityksen jakauma on hyvin samankaltainen PLAXIS 2D:llä lasketun jakauman kanssa. Näin ollen voidaan todeta, että Boussinesqin pistekuormateoria negatiivisilla kuormilla approksimoi kaivun aiheuttamaa muutosta pystyjännityksiin hyvin, kun vertailukohtana pidetään FEM-laskennan tuloksia.

Kuvaa 41 vastaavaa kaivun aiheuttaman ylikonsolidaation (POP) kuvaajaa ei ole PLAXIS 2D -ohjelmasta suoraan mahdollista saada, koska ohjelmassa käytetään ylikonsolidaation laskennassa ylikonsolidaatioastetta (OCR, overconsolidation ratio). Tehokkaiden pystyjännitysten jakaumasta voidaan kuitenkin päätellä, että kaivu aiheuttaa myös FEM-laskennassa Kuvan 41 kaltaisen ylikonsolidaation pohjamaahan, sillä laskennassa vallitseva jännitys muuttuu, mutta esikonsolidaatiojännitys kullakin syvyydellä säilyy alkutilanteeseen nähden muuttumattomana.

GeoCalcilla ei automaattisesti voida laskea kaivusta aiheutuvaa jännitysmuutosta. Seuraavassa on tarkasteltu kaivun mallintamista GeoCalcissa kahdella eri tavalla. GeoCalc-vertailulaskelman 1 geometria on esitetty Kuvassa 45, ja vertailulaskelman 2 geometria Kuvassa 46. Vertailulaskelman 1 laskentamalli on muodostettu siten, että maanpinta on mallinnettu tasaiseksi, ja kuorma on asetettu vaikuttamaan kaivutasoon. Vertailulaskelman 2 laskentamalli on muodostettu mallintamalla vain kaivupinnan alapuoliset maakerrokset. Savikerros on jaettu useampaan osakerrokseen, joille kullekin on annettu ylikonsolidaation (POP) arvot kerroksittain vastaamaan PP-moottorilla laskettua tilannetta.

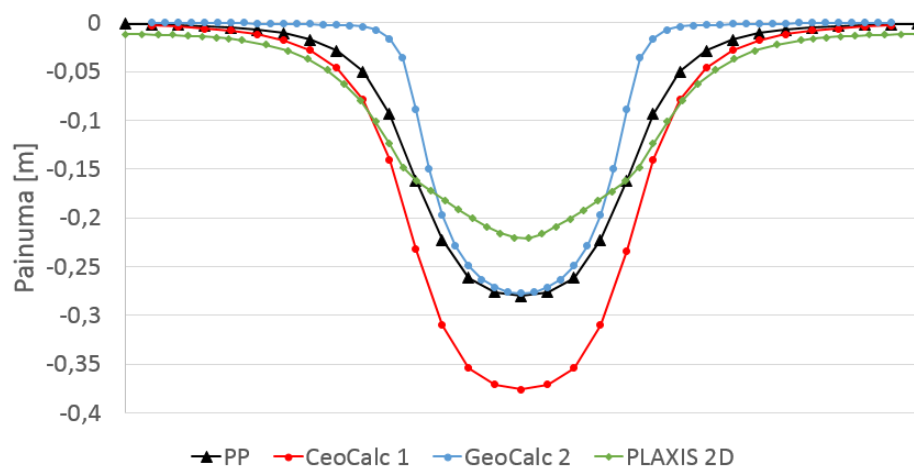


Kuva 45. GeoCalc-vertailulaskelma 1, laskentamalli.

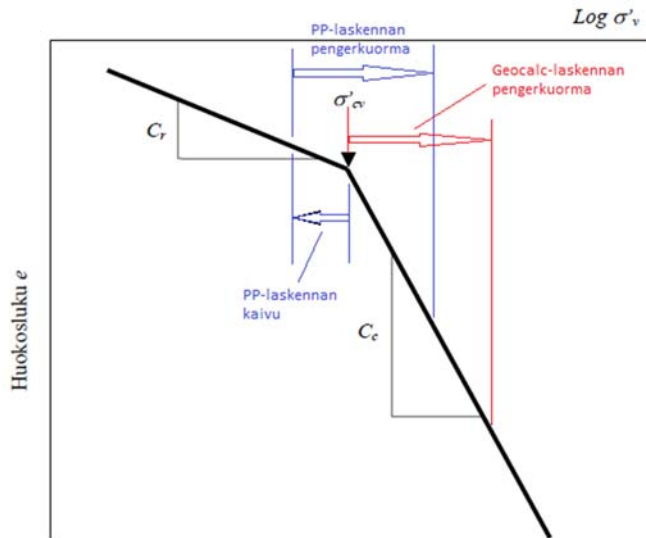


Kuva 46. GeoCalc-vertailulaskelma 2, laskentamalli.

Eri ohjelmilla lasketut painumat on esitetty Kuvassa 47. GeoCalc-vertailulaskelman 1 painumat ovat PP-moottorilla laskettuja suurempia. Tämä johtuu siitä, että GeoCalc-laskelmassa kuorman aiheuttama jännityslisäys on kokonaan normaalikonsolidoituneella alueella, kun käytetään vertailulaskelman 1 mallinnustapaa. PP-laskennassa on ensin laskettu kaivun aiheuttama jännitysmuutos ja ylikonsolidaatio, ja vasta sen jälkeen asetettu kuormitus vaikuttamaan kaivupintaan. Laskelmien eroa on havainnollistettu Kuvassa 48.



Kuva 47. Eri ohjelmilla lasketut painumakuvaajat.



Kuva 48. Periaatekuva PP- ja GeoCalc-vertailulaskelman 1 jännitysmuutoksista. (muokattuna, Länsivaara 2000, s. 37).

GeoCalc-vertailulaskelman 2 painumat vastaavat paremmin PP-moottorilla laskettuja painumia penkereen keskellä, koska laskelmien jännityslisäyksiä edeltävät konsolidaatiotilat vastaavat paremmin toisiaan. Kuvan 41 kaltaista sivusuunnassa muuttuvaa ylikonsolidaatiota ei ole GeoCalc-laskennassa kuitenkaan mallinnettu, joten painumakuvaajat eroavat toisistaan penkereen reunoilla.

PLAXIS 2D-laskennassa kaivu on PP-laskelman tapaan mallinnettu erikseen. PLAXIS 2D:llä lasketut painumat ovat penkereen keskellä PP-moottorilla laskettuja pienempiä, mutta reunoilla hieman suurempia. Tämä indikoi, että pengerkuorma jakaantuu FEM-laskennassa laajemmalle alueelle.

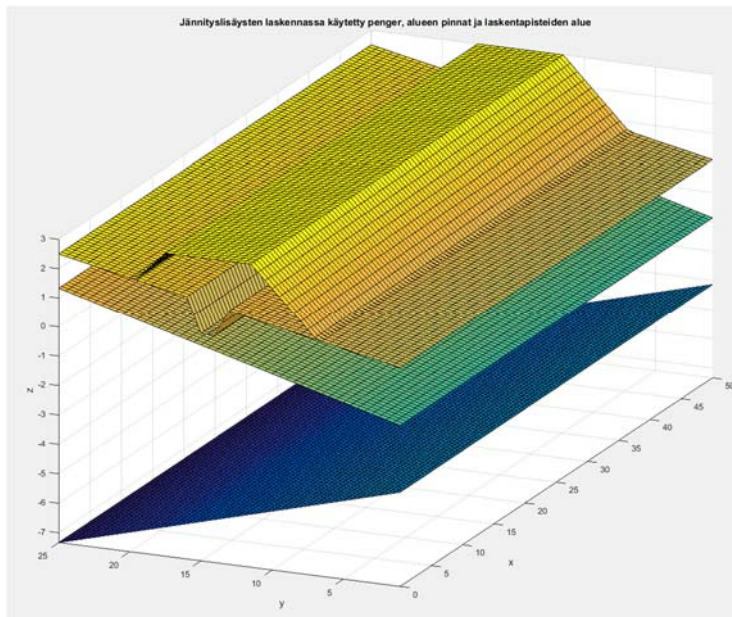
Testilaskennan 3 perusteella voidaan todeta, että laskentamoottori toimii laskennallisesti oikein kaivusta aiheutuvien jännitystilän muutosten mallinnuksessa sekä kaivupinnan sisältämän laskentamallin painumien laskennassa. Lisäksi FEM-vertailulaskelman perusteella voidaan todeta, että PP-laskentamoottorin käyttämä Boussinesqin pistekuormateorian superpositioperiaate negatiivisilla kuormilla on käyttökelpoinen kaivusta aiheutuvien pystyjännitysten ja konsolidaatiotilan muutosten laskennassa. Eri ohjelmilla lasketut maksimipainumat on esitetty Taulukossa 10.

Taulukko 10. Testilaskennan 2 maksimipainumat eri ohjelmilla

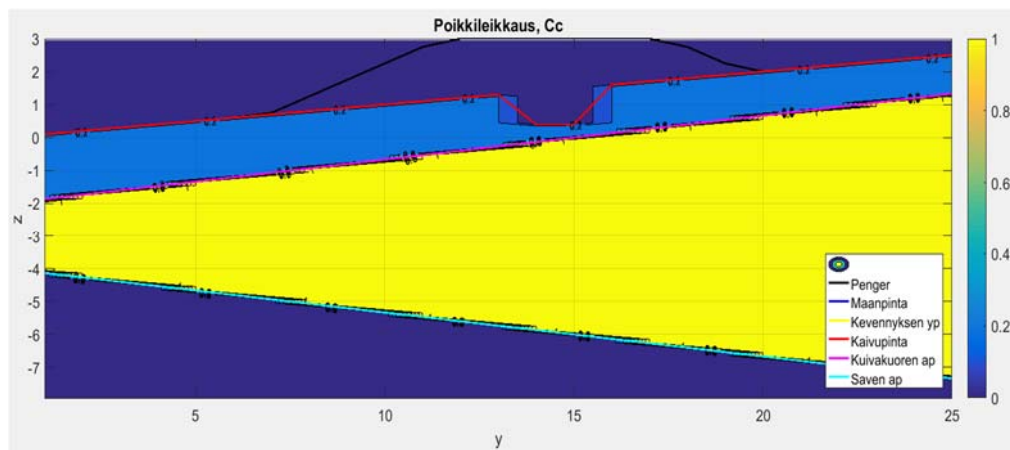
Ohjelma	Maks. painuma [m]
PP	0,281
GeoCalc 1	0,376
GeoCalc 2	0,277
PLAXIS 2D	0,221

4.3.4 Testilaskenta 3: kaltevat pinnat ja oja

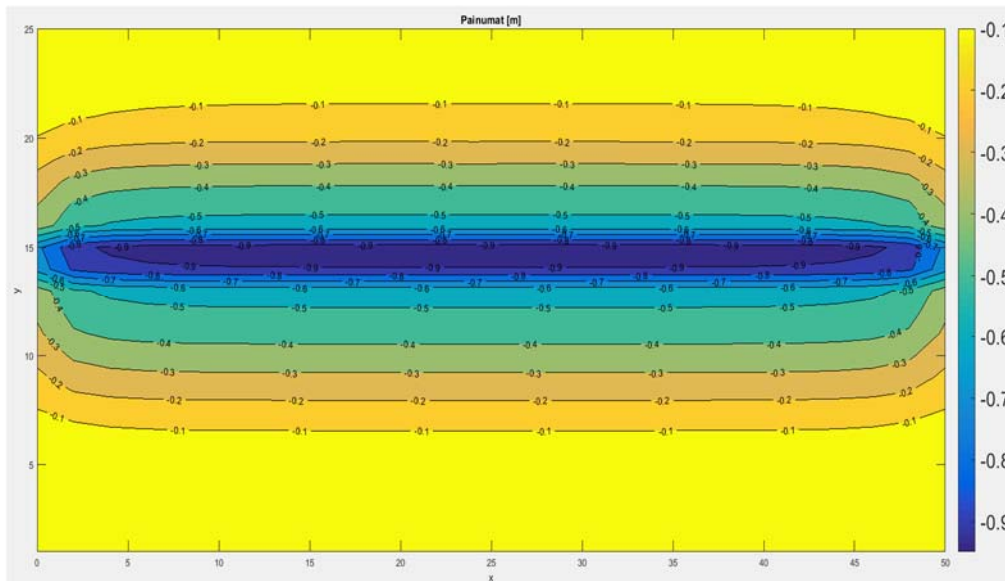
Testilaskennassa 3 testattiin laskentamoottorin toimintaa, kun ohjelmaan sisään luetut maaperän rajapinnat ovat kaltevia ja maanpinnassa keskellä pengertä on olemassa oleva oja. Maaparametrit ovat laskelmissa samat kuin testilaskennassa 1. Testilaskennan 3 laskentamalli on esitetty *Kuvassa 49* ja poikkileikkausgeometria *Kuvassa 50*. PP-moottorilla laskettujen painumien tasa-arvokäyrät on esitetty *Kuvassa 51*. Laskelmissa savi on oletettu normaalisti konsolidoituneeksi.



Kuva 49. Testilaskennan 2 geometria

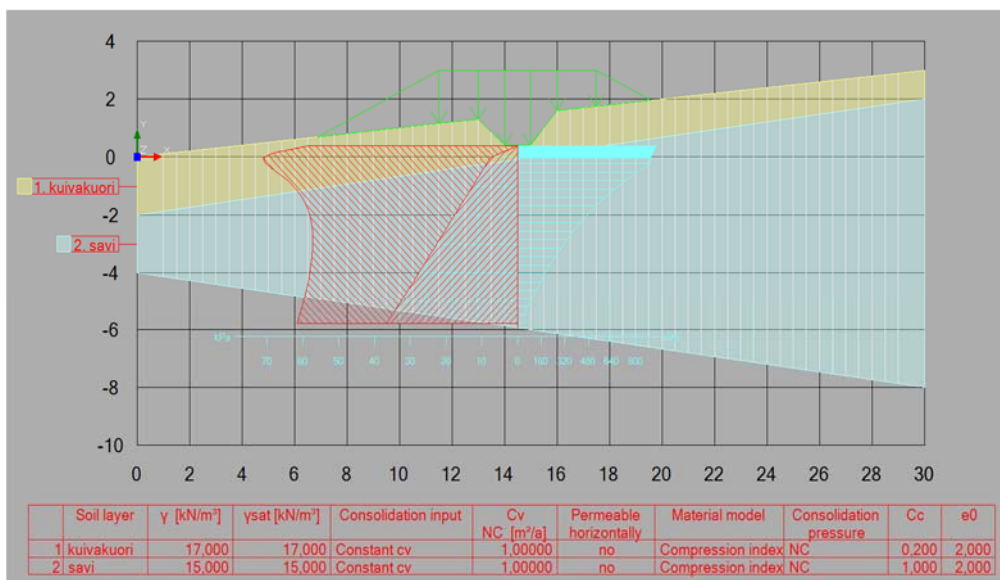


Kuva 50. Poikkileikkausgeometria PP-moottorilla, C_c :n arvot.

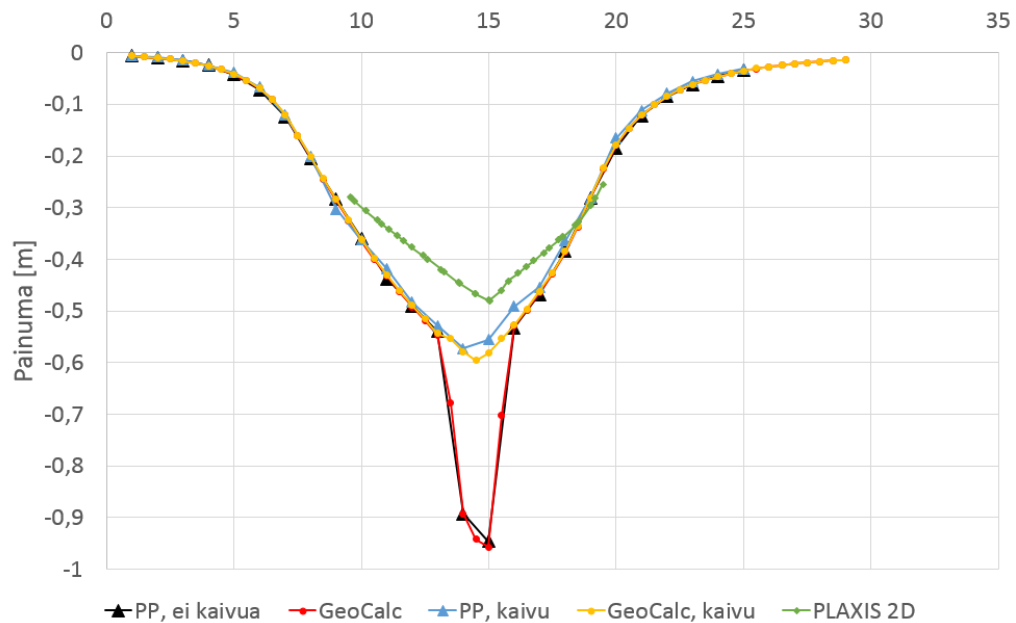


Kuva 51. Painumien tasa-arvokäyrät PP-moottorilla laskettuna.

Samanlainen laskentageometria GeoCalcilla on esitetty Kuvassa 52. Poikkileikkauksen painumakuvaajat eri ohjelmilla laskettuna on esitetty Kuvassa 53. Kuvassa on esitettynä painumat laskettuna molemmilla ohjelmilla myös siten, että maanpinta on aluksi mallinnettu tasaisena ja oja kaivupintana. Lisäksi kuvassa on PLAXIS 2D:llä lasketut painumat. Kuvasta 53 havaitaan, että PP:n ja GeoCalcin painumakuvaajat ovat jälleen lähes identtiset.



Kuva 52. GeoCalc-laskentamalli, kun oja on osa luonnontilaista maanpintaa.

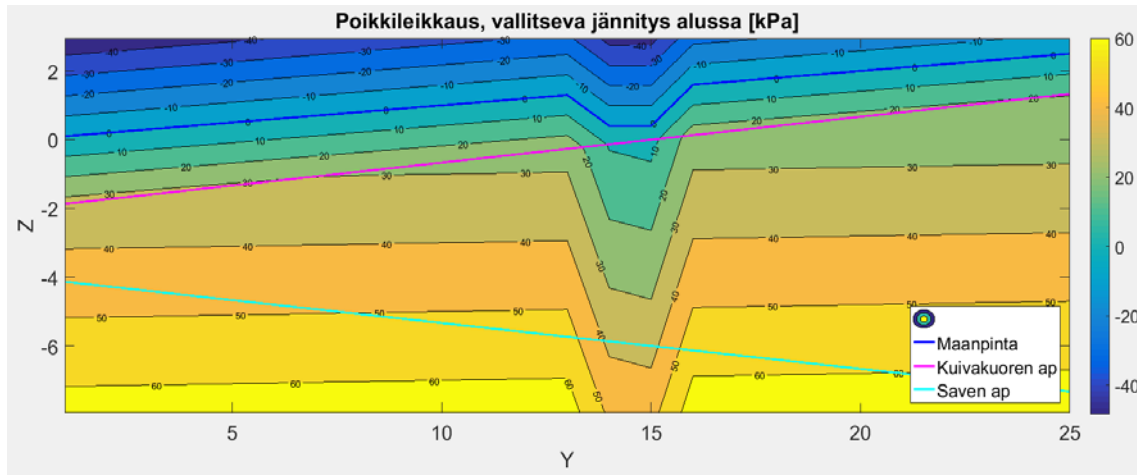


Kuva 53. Painumakuvaajat eri ohjelmilla laskettuna.

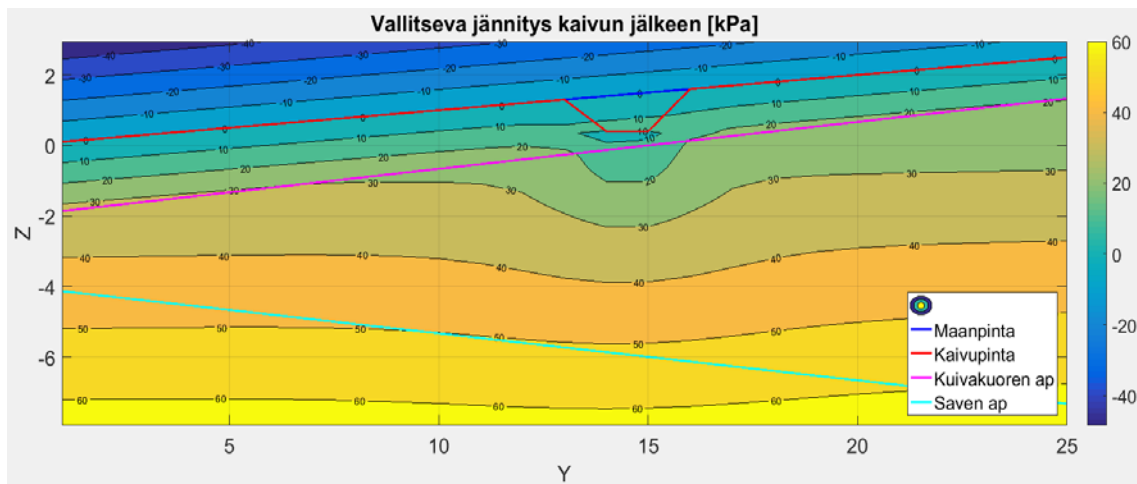
Sekä GeoCalc- että PP-laskelmissa on ojan kohdalla huomattavasti suurempi painuma kuin muualla, kun oja ei mallinneta kaivuna. Tämä johtuu siitä, että ojan alapuolella olevissa laskentapisteissä vallitseva jännitys on huomattavasti pienempi kuin muualla. Laskennallista epätasaista painumaa korostaa vielä se, että ojan kohdalla kuivakuorikerros on niin ohut, että ojan alla savikerroksen yläosan pisteisiin kohdistuu suurempia jännityslisäyksiä kuin ojan ulkopuolella, jossa suurimmat jännityslisäykset ovat kuivakuorikerroksessa.

Todellisuudessa maanpinnan geometria ei vastaa ojan kohdalla luonnontilaista maanpintaa, vaan oja on kyseiseen kohtaan joskus kaivettu. Kuvassa 54 on esitetty PP-moottorilla laskettu vallitseva jännitys, kun oja on mallinnettu osana maanpintaa. Vastaava kuva, kun ojan kaivu on laskettu negatiivisena kuormana, on esitetty Kuvassa 55. Kuvia vertaamalla havaitaan, että kun oja mallinnetaan osana luonnontilaista maanpintaa, muodostuu ojan kohdalle pykälä vallitsevassa jännityksessä ja esikonsolidaatiojännityksessä, mikä aiheuttaa korostuneen painumaeron ojan kohdalla.

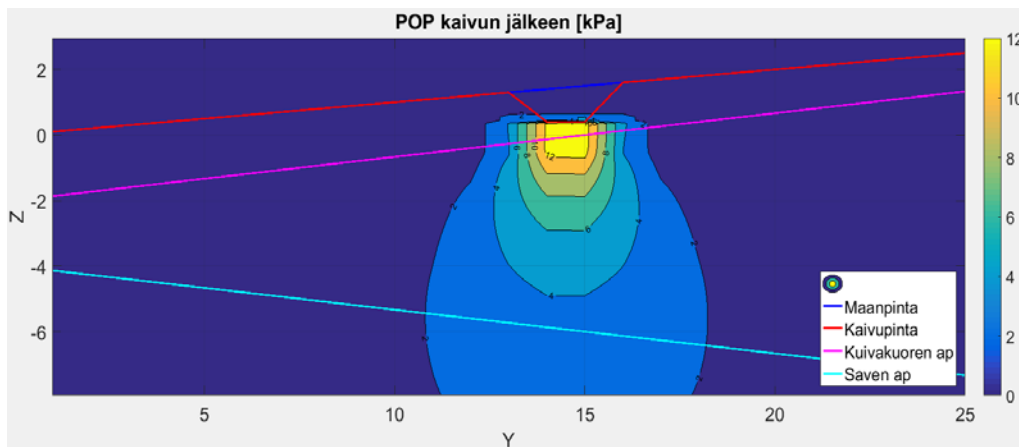
Kaivusta aiheutuu maapohjaan ojan ympäristöön ylikonsolidaatiota, koska esikonsolidaatiojännitys säilyy samana, vaikka vallitseva jännitys muuttuu. Tämä tasaa painumaeroa ojan kohdalla. PP-moottorilla laskettu ojan kaivusta aiheutuva ylikonsolidaatio on esitetty kuvassa 56.



Kuva 54. Vallitseva jännitys = esikonsolidaatiojännitys, kun oja on mallinnettu osana luonnontilaista maanpintaa.

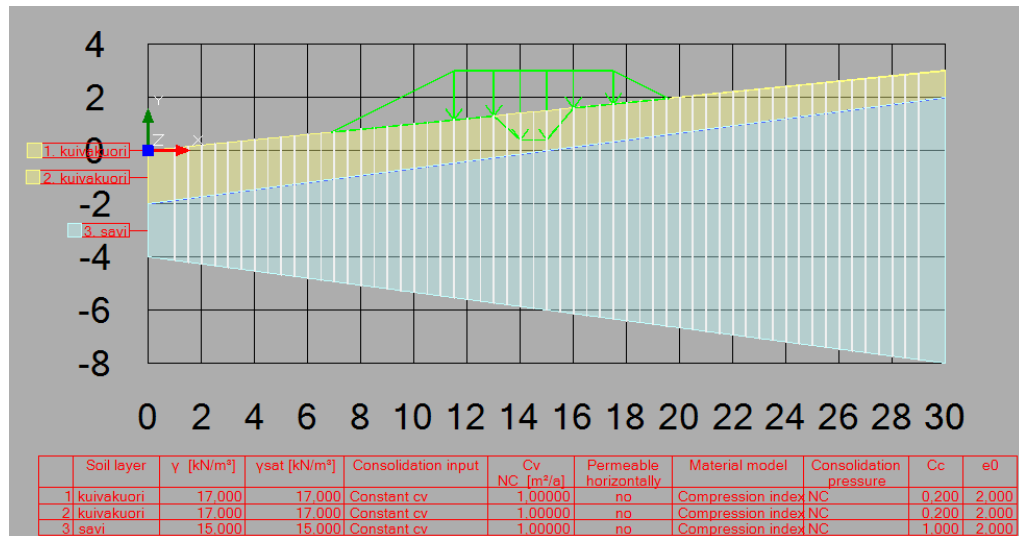


Kuva 55. Vallitseva jännitys, kun ojan kaivu on mallinnettu negatiivisena kuormana. Esikonsolidaatiojännitys on alkuperäisen maanpinnan mukainen.



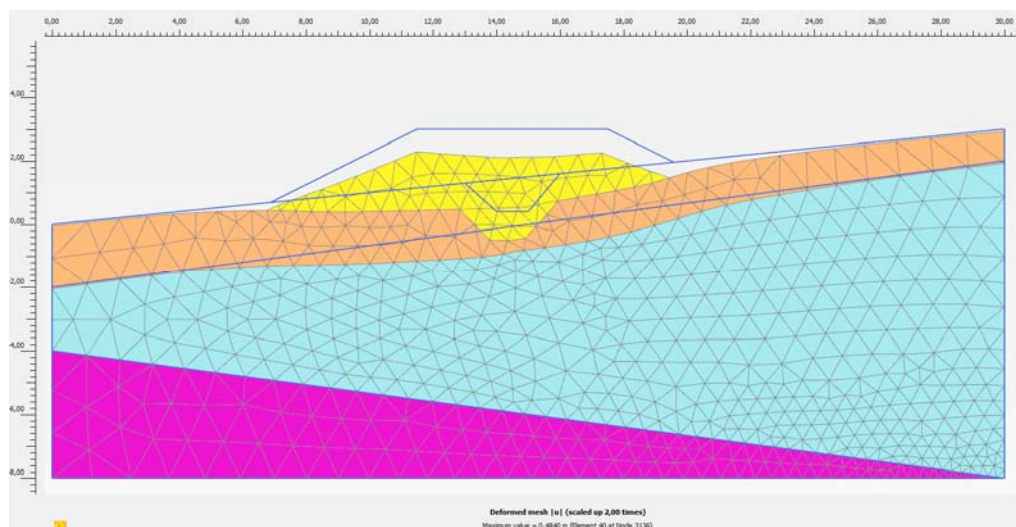
Kuva 56. Ojan kaivun aiheuttama ylikonsolidaatio.

GeoCalcilla kaivua ja siitä aiheutuvaa ylikonsolidaatiota ei voida suoraan laskea. GeoCalc-vertailulaskelmassa laskentamalli on muodostettu siten, että maakerrokset on mallinnettu ilman ojaa, ja pengerkuorma on asetettu vaikuttamaan ojan kohdalla ojan pohjan tasoon. Tällöin laskennassa käytetyt vallitsevat jännitykset ja esikonsolidaatiojännitykset vastaavat paremmin PP-laskelmaa. GeoCalc-laskentamalli on esitetty Kuvassa 57.



Kuva 57. GeoCalc-laskentamalli, kun oja mallinetaan kaivuna.

PLAXIS 2D:llä lasketut siirtymät samalla geometrialla on esitetty Kuvassa 58. Laskelmassa on mallinnettu ojan kaivu omana laskentavaiheenaan. Laskentamalliin on lisätty savikerroksen alapuolelle kerros, jotta mallin alareuna saadaan vaakasuoraksi. Tälle ylimääräiselle kerrokselle on annettu niin suuri jäykkyys, että sen muodonmuutokset eivät juurikaan vaikuta laskettuihin painumiin. Laskenta on tehty PLAXIS 2D:n "consolidation, minimum excess pore pressure" -valinnalla, jolloin tuloksena saadaan muodonmuutokset, kun penkereen aiheuttamasta huokosveden ylipaineesta on jäljellä alle 1 kPa eli kun primaarinen konsolidaatio on likimain päättynyt.



Kuva 58. PLAXIS 2D laskennan geometria konsolidaation lopussa. Huom. siirtymät skaalattu kaksinkertaisiksi.

Kuvassa 53 havaitaan, että FEM-laskennan painumat ovat PP-moottorilla ja GeoCalcilla laskettuja pienempiä, vaikka oja mallinnetaan ohjelmissa kaivuna. Tämä johtunee siitä, että FEM-laskennassa huomioidaan myös vaakajännitysten vaikutus, ja vierekkäisten pisteiden painumat vaikuttavat toisiinsa. GeoCalcilla ja PINTAPAINUMA-moottorilla laskettaessa vierekkäisten pisteiden painumat eivät riipu toisistaan ja näin ollen ojan kohdalla oleva jännityskeskittymä ei jakaannu yhtä laajalle alueelle kuin FEM-laskennassa.

Testilaskennan 3 perusteella voidaan todeta, että PINTAPAINUMA-moottorilla sekä GeoCalcilla lasketut avoimen tilan painumat vastaavat toisiaan erittäin hyvin myös kaltevilla pinnoilla. Maanpinnassa oleva oja aiheuttaa laskennallisesti ylikorostuneen epätasaisen painuman, kun ojaa ei mallinneta erikseen kaivuna. Usein tietomallin maanpinta sisältääkin olemassa olevia ojia, joiden mallintaminen kaivuna vaatisi laskentaa varten erikseen maanpinnan, joka on ojien kohdalla tasainen. Tämän mallintaminen voi olla hankalaa ja työlästä. Virhe joka tapauksessa pienenee, kun ojan leveys tai syvyys pienenevät.

Eri ohjelmilla lasketut maksimipainumat on esitetty *Taulukossa 11*.

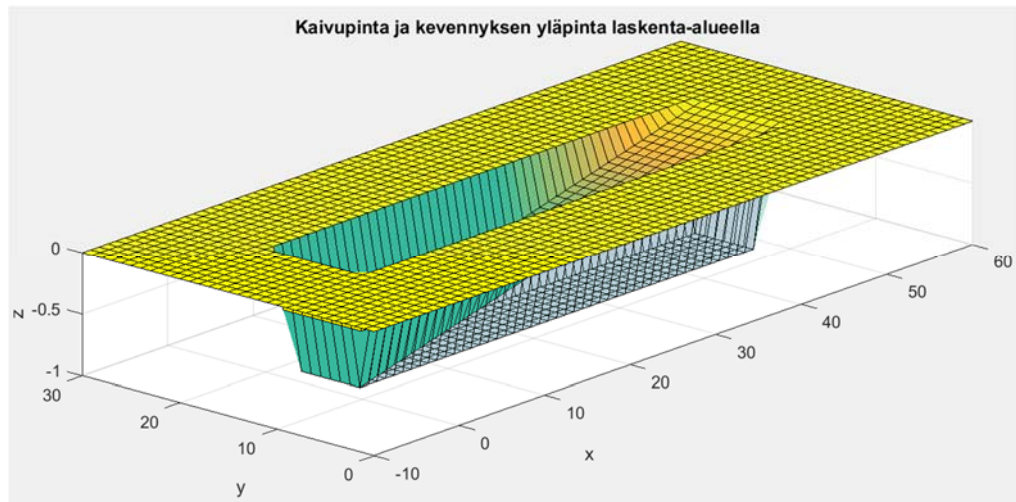
Taulukko 11. Testilaskennan 3 maksimipainumat eri ohjelmilla

Ohjelma	Maks. painuma [m]
PP, ei kaivua	0,923
GeoCalc, ei kaivua	0,954
PP, kaivu mallinnettu	0,573
GeoCalc, kaivu mallinnettu	0,596
PLAXIS 2D	0,480

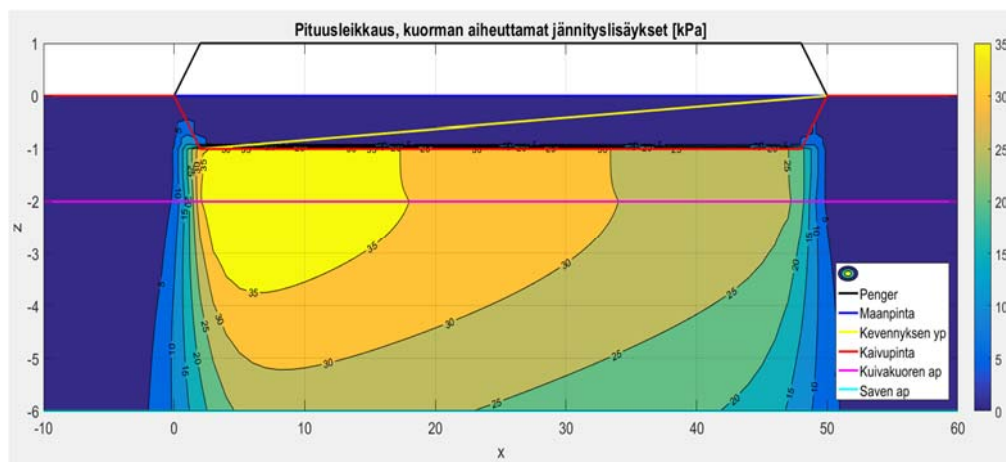
4.3.5 Testilaskenta 4: kevennysrakenne

Testilaskennassa 4 tarkasteltiin PP-moottorin tuloksia, kun laskentamallissa penkereen alle tehdään kaivu ja pituussuunnassa kalteva kevennysrakenne. Laskennassa testattiin myös moottorin toimintaa, kun laskennassa huomioidaan kuormituksen pieneneminen maa-ainesten painuessa pohjavedenpinnan alapuolelle. Laskennan tuloksia verrattiin FEM-laskentaan. Testilaskennan 4 geometria kaivua ja kevennysrakennetta lukuun ottamatta on sama kuin testilaskennassa 1. Laskennan kaivupinnan ja kevennysrakenteen yläpinnan 3D-geometria on esitetty *Kuvassa 59*. Kevennysmateriaalin tilavuuspainoksi on laskennassa asetettu 5 kN/m³.

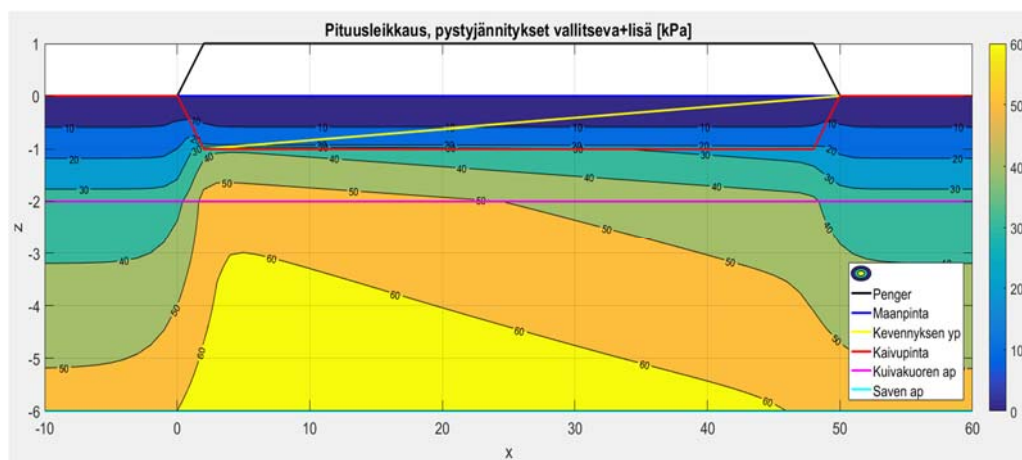
PP-moottorilla lasketut penkereen ja kevennysmateriaalin aiheuttamat jännityslisäykset pituusleikkauksessa keskeltä pengertä on esitetty *Kuvassa 60*. Kaivusta aiheutuvat vallitsevien jännitysten ja ylikonsolidaation muutokset on ohjelmassa laskettu ennen varsinaisen kuormituksen laskentaa. Kuorman aiheuttamat jännityslisäykset lisätään jokaisessa laskentapistessä vallitsevaan jännitykseen. PP-moottorilla lasketut jännitykset kaivun ja kuorman laskennan jälkeen on esitetty *Kuvassa 61*. Laskelmat on tehty ilman nosteen vaikutuksen huomioimista.



Kuva 59. Kaivupinta ja kevennyksrakenteen yläpinta testilaskennassa 4.



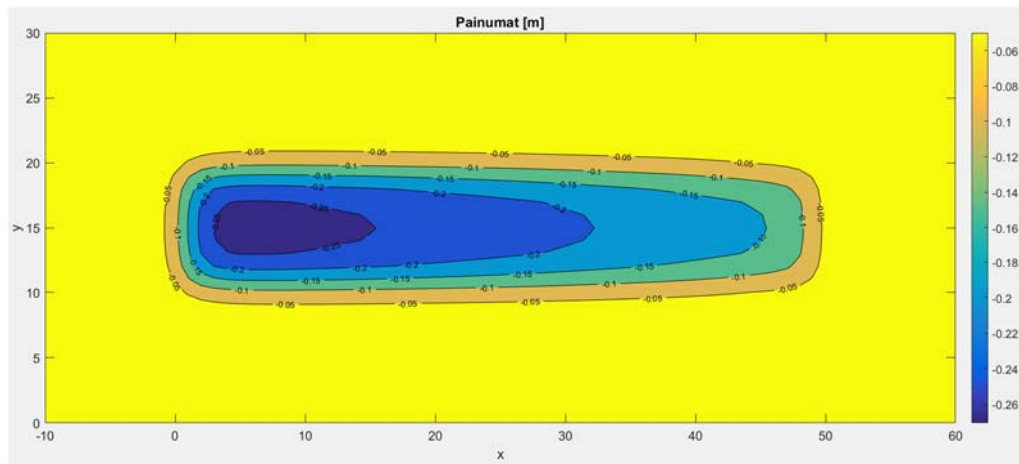
Kuva 60. Kuorman aiheuttamat jännityslisäykset pituusleikkauksessa.



Kuva 61. Tehokkaat jännitykset pituusleikkauksessa kuormituksen alaisena. Huom. Kaivupinnan yläpuolisilla jännityksillä ei ole laskennassa merkitystä, sillä ko. pisteiden C_c ja C_r ovat nollia.

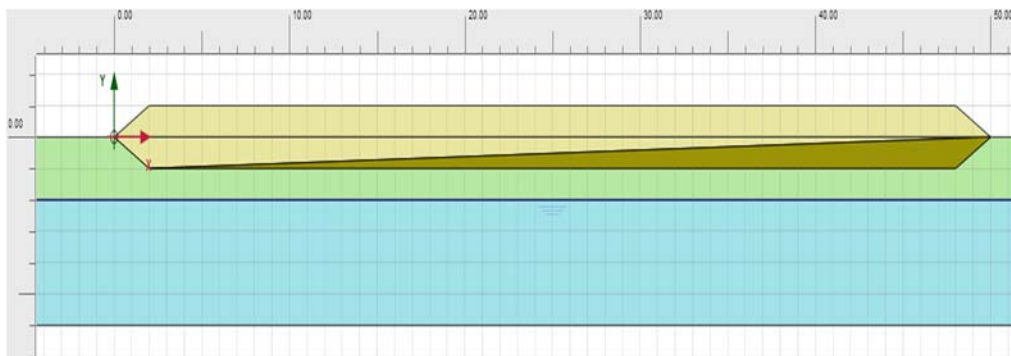
Kuvista 60 ja 61 nähdään, että PP-moottorilla lasketut kaltevasta kevennysrakenteen pinnasta johtuvat jännityslisäysten ja tehokkaiden jännitysten jakaumat kuorman alla ovat loogisen muotoisia. Penkereen alkupäässä lähellä x-akselin nollakohtaa, missä penger vaikuttaa kuormituksena täydellä korkeudellaan $h = 2 \text{ m}$, on kuormasta aiheutuva jännityslisäys likimain $2 \text{ m} \cdot 20 \text{ kN/m}^3 = 40 \text{ kPa}$. Jännityslisäykset pienenevät kevennysrakenteen paksuntuessa vähitellen x-akselin positiiviseen suuntaan.

PP-moottorilla ilman nosteen huomioimista laskettujen painumien tasa-arvokäyrät on esitetty Kuvassa 62. Kuvasta havaitaan, että myös painumapinnan muoto vaikuttaa oikeanlaiselta. Suurimmat painumat ovat x-akselin alkupäässä poikkisuunnassa keskellä pengertä, ja pienenevät x-koordinaatin kasvaessa sekä penkereen keskilinjalta ulospäin.

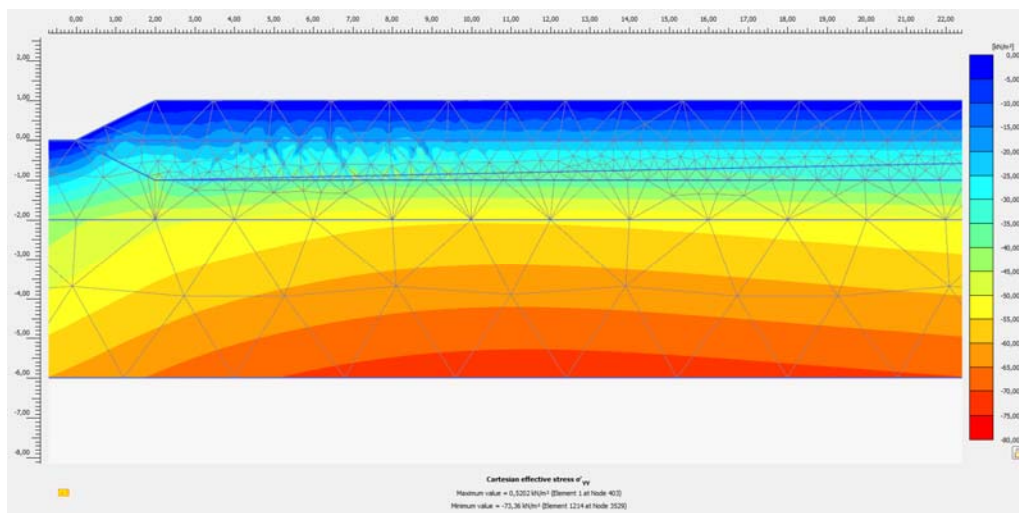


Kuva 62. Painumien tasa-arvokäyrät.

Kaltevan kevennysrakenteen laskentamalli PLAXIS 2D –ohjelmalla on esitetty kuvassa 63 ja penkereen alkupään tehokkaat pystyjännitykset primaarisen konsolidaation lopussa Kuvassa 64.



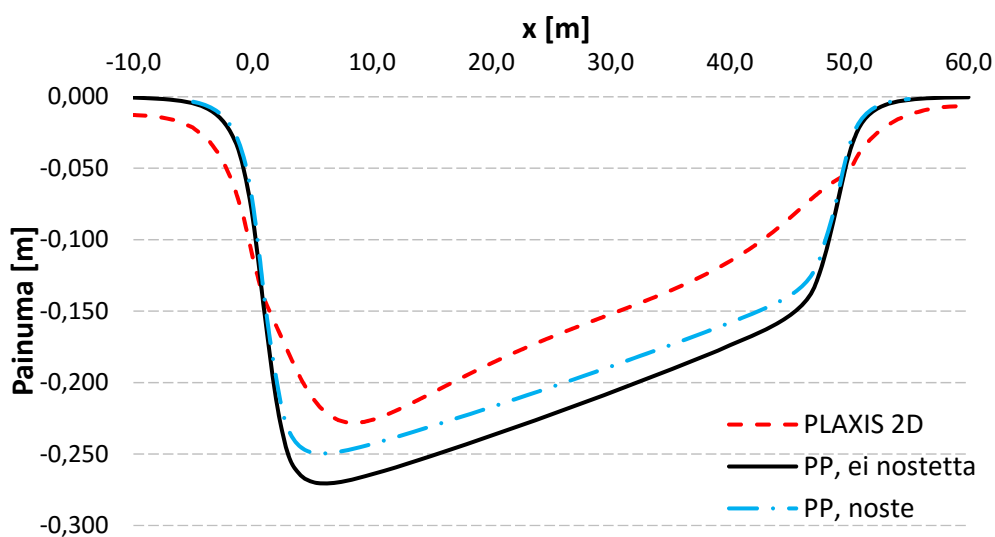
Kuva 63. PLAXIS 2D laskentamalli.



Kuva 64. Tehokkaat pystyjännitykset primaarisen konsolidaation lopussa. Maksimiarvo 73,4 kPa.

Kuvia 61 ja 64 vertaamalla havaitaan, että FEM-laskennassa jännitys jakauma on laakeampi ja maksimiarvot syvällä savikerroksessa ovat PP-moottorilla laskettuja etäämmällä penkereen reunasta. Näin ollen voidaan päätellä, että PP-moottorilla laskettaessa yliarvioidaan hieman jännityksiä syvemmällä savikerroksessa penkereen ollessa paksuimmillaan, ja toisaalta aliarvioidaan jännityksiä kevennysrakenteen paksummassa päässä. Savikerroksen yläosissa jakaumat vastaavat toisiaan paremmin, mikä on painumien ja kaltevuuden muutosten laskennan kannalta tärkeää, koska suurimmat muodonmuutokset tapahtuvat juuri kerroksen yläosissa.

PP-moottorilla ja PLAXIS 2D -ohjelmalla lasketut painumakuvaajat pituusleikkauksessa on esitetty Kuvassa 65. Kuvassa on myös mukana painumat laskennasta, jossa on huomioitu nosteen aiheuttaman kuormituksen pieneneminen. Nosteen vaikutuksen laskennassa käytetty kuormainkrementtien määrä on $n=10$.



Kuva 65. Pituusleikkauksen painumat testilaskennassa 4.

Kuvasta 65 havaitaan, että FEM-laskennalla saadaan jälleen pienemmät kokonais-painumat johtuen muun muassa kappaleessa 4.3.2 käsitellyistä eroista FEM-laskennan ja PP-moottorin välillä. Nosteen huomioivalla laskennalla painumat ovat lähempänä PLAXIS 2D:llä laskettuja, mutta ovat edelleen suuremmat. Painumista aiheutuvat penkereen kaltevuuden muutokset ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa. Laskelmien maksimipainumat on esitetty *Taulukossa 12*.

Taulukko 12. Testilaskennan 4 maksimipainumat eri ohjelmilla.

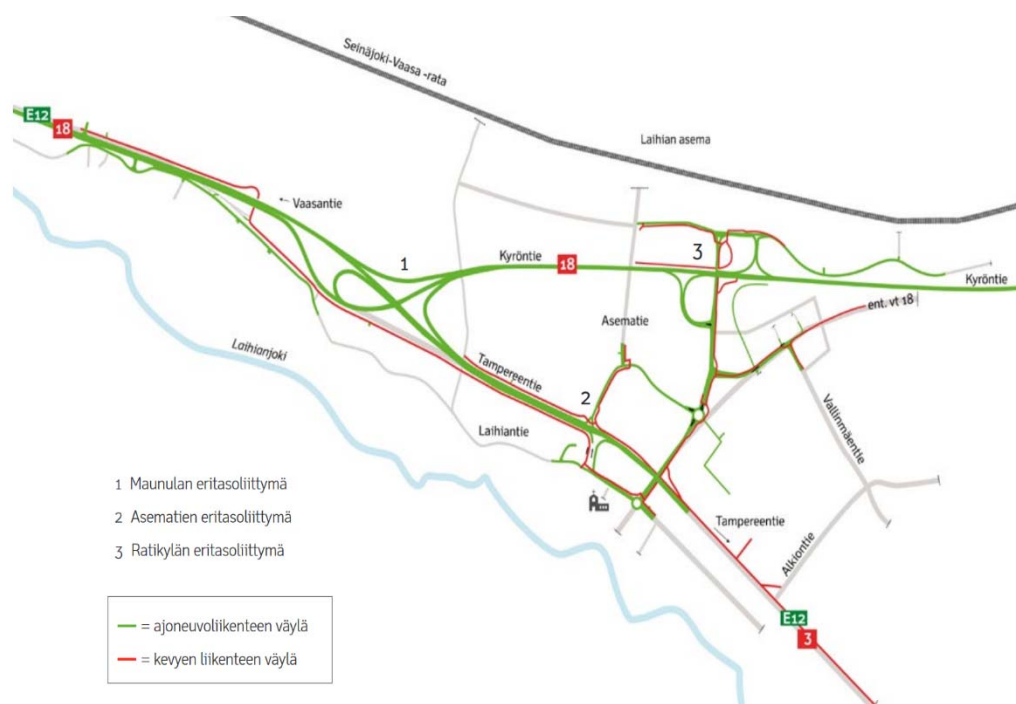
Ohjelma	Maks. painuma [m]
PP, ei nostetta	0,271
PP, noste	0,250
PLAXIS 2D	0,228

5 Koelaskenta tietomallilla

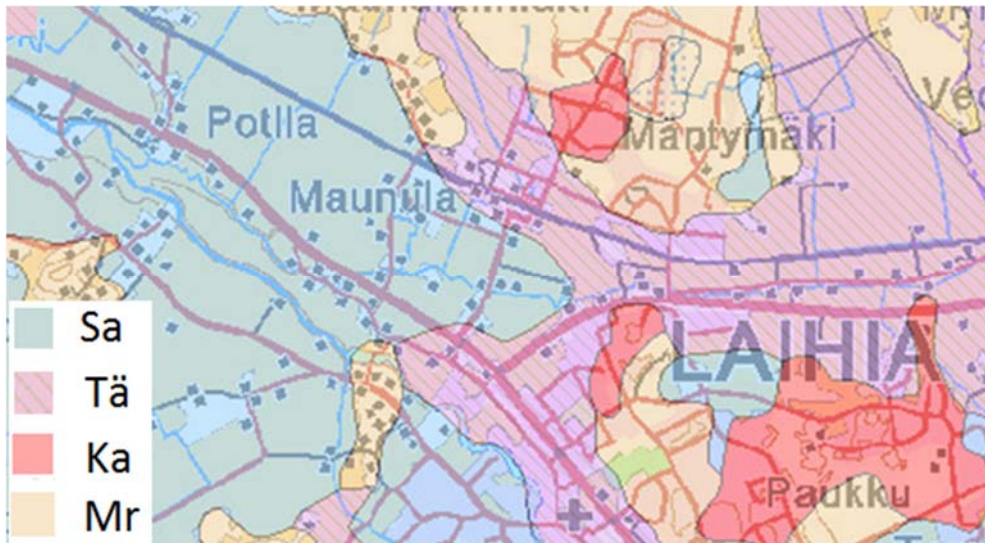
5.1 Koelaskentakohde Vt3/Vt18 Laihia

Edellisessä luvussa käsitellyt testi- ja validointilaskelmat suoritettiin keinotekoisilla kolmiopinnoilla, joiden kolmioiden kärkipisteiden koordinaatit määritettiin suoraan pintojen *.txt tiedostoihin. Laskentamoottorin käytettävyyden toteamiseksi tehtiin moottorilla koelaskentaa myös todellisesta kohteesta.

Koelaskennan kohteena oli Vt3/Vt18 Laihia -väylähanke, jossa valtatie 3 ja valtatie 18 solmukohdan liikenteen sujuvuutta ja turvallisuutta parannetaan muun muassa muuttamalla valtateiden risteyskohta eritasoliittymäksi. Hanke sijoittuu suurelta osin savipehmeikölle, ja hankkeessa on jo suunnitteluprosessin alkuvaiheista lähtien hyödynnetty tietomallintamista. Karttakuva hankkeen suunnitelluista väylistä on esitetty Kuvassa 66 ja alueen maaperäolosuhteet Kuvassa 67. (Liikennevirasto 2017).



Kuva 66. Vt3/Vt18 Laihia -hanke. (Liikennevirasto 2017).



Kuva 67. Alueen maaperä. (muokattuna, GTK 2017).

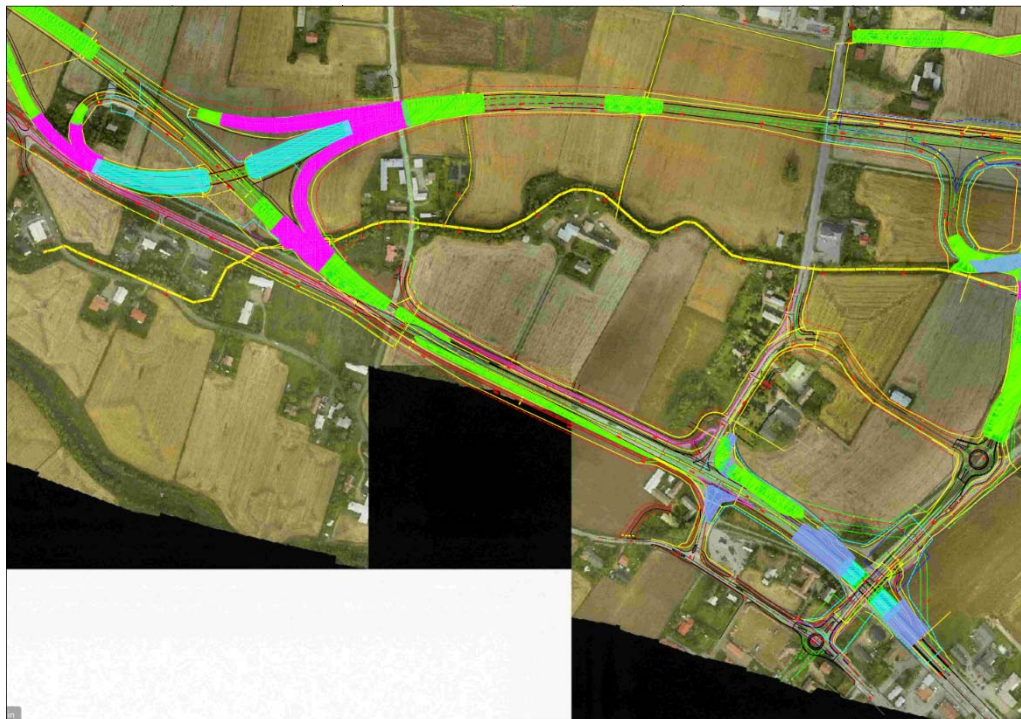
Laajasta savipehmeiköstä johtuen hankkeessa joudutaan tekemään mittavia pohjanvahvistustoimenpiteitä väylien käytönaikaisten painumien ehkäisemiseksi. Luonnoskartat osasta hankkeen pohjanvahvistustoimenpiteitä on esitetty Kuvissa 68 ja 69. Kuvien värikoodaus on seuraava: vihreä = esikuormituspenger, violetti = pilaristabilointi, turkoosi = paalulaatta, sininen = kevennysrakenne.

Kuten Kuvista 68 ja 69 on havaittavissa, on uuden tielinjauksen matalille osuuksille sekä olemassa olevan tien levennysten kohdalle valittu pääasialliseksi pohjanvahvistustoimenpiteeksi saven esikuormittaminen. Pengerkorkeuden kasvaessa esikuormitusratkaisu ei ole enää toimiva, ja eritasoliittymän rampeissa siirrytäänkin ensin pilaristabilointiin ja suurimmilla pengerkorkeuksilla eritasoliittymän sillan tulopenkerereiden kohdalla perustamisratkaisuna on paalulaatta. Esikuormittaminen on edellä esitetyistä pohjarakennusratkaisuista rakennuskustannuksiltaan ylivoimaisesti edullisin, mutta siihen liittyy aina tien käytönaikaisten painumien riski esikuormittamisesta huolimatta, johtuen muun muassa konsolidaatioprosessin hitaudesta sekä mahdollisesta esikuormituksen poiston jälkeisestä sekundaari-painumasta.

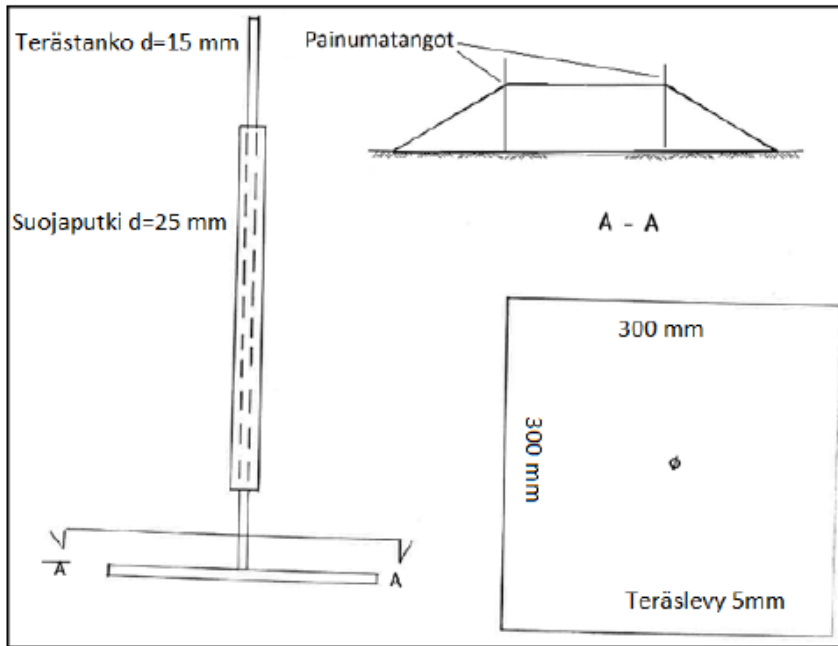
Työssä suoritettiin koelaskentaa Maunulan eritasoliittymän kohdalla olevasta haarautuvasta esikuormituspenkereestä, joka on näkyvässä Kuvassa 68. Esikuormituspenkereitä on hankkeessa rakennettu alkuvuonna 2016. Penkereiden painumakäyttäytymistä on seurattu mittaamalla rakentamisen yhteydessä asennettujen painumatankojen korkoja ajan myötä. Painumatankojen asennusperiaate on esitetty Kuvassa 70. Tässä työssä tarkastellut esikuormituspenkereiden painumat perustuvat aikavälillä 02/2016...01/2017 eli 11 kuukauden aikana tehtyihin painumahavaintoihin.



Kuva 68. Vt3/Vt18 Laihia -hankkeen pohjanvahvistustoimenpiteitä (muokattuna, A-Insinöörit 2015).



Kuva 69. Vt3/Vt18 Laihia -hankkeen pohjanvahvistustoimenpiteitä (muokattuna, A-Insinöörit 2015).



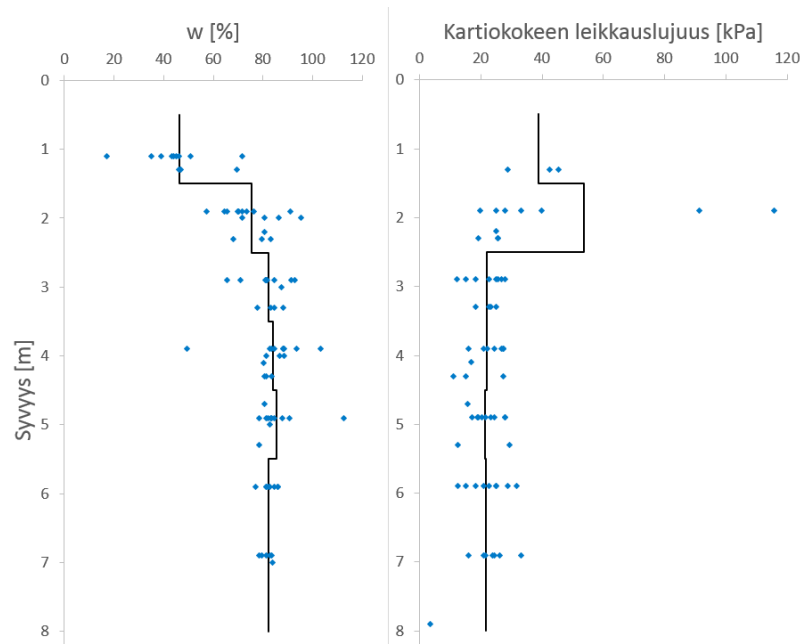
Kuva 70. Painumatankojen asennusperiaate (A-Insinöörit 2016).

5.2 Kohteen maaparametrit

Painumalaskennan, kuten muunkin geoteknisen mitoituksen mahdollisesti haastavin osatehtävä on mitoituslaskelmissa käytettävien maaparametrien määrittäminen ja valinta. Maaparametreihin sisältyy aina epävarmuutta, mikä johtuu parametrien luonnollisesta vaihtelusta ja havaintojen rajallisesta määrästä. Lisäksi, kun koetulosten perusteella määritetään jokin maaparametri, käytetään aina jotakin muunnosmallia, johon jo itsessään sisältyy epävarmuutta. (Phoon 2008, s. 6).

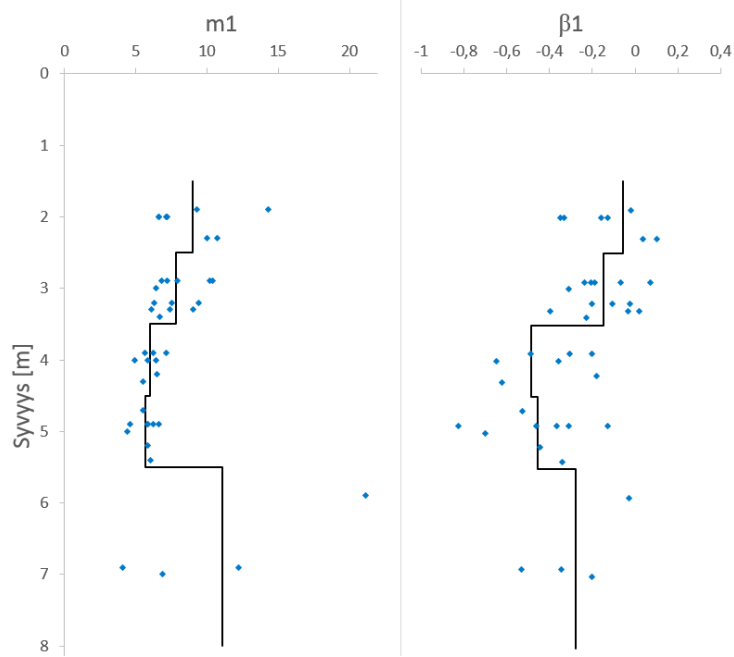
Koelaskennassa käytetyn esikuormituspenkereen kohdalta sekä sen välittömästä läheisyydestä on otettu vain muutamasta kohdasta häiriintymättömät näytteet, joille on tehty laboratoriossa ödometrikokeet sekä mitattu muun muassa vesipitoisuuksia. Tässä työssä on maaparametrien määrittämisessä kuitenkin käytetty koko hankkeen alueelta tehtyjä laboratoriotutkimuksia, joista osa sijaitsee yli 1 km päässä tarkasteltavasta esikuormituspenkereestä. Koko alueen pehmeikön voidaan maaperäkartan perusteella olettaa olevan samaa saviallasta, joten havaintojen hieman kauempana on oletettu edustavan tarkasteltavan penkereen alla olevan saven ominaisuuksia.

Alueen savesta laboratoriossa mitatut vesipitoisuudet, kartiokokeen leikkauslujuudet sekä näiden keskiarvot syvyyksittäin metrin kerroksin on esitetty *Kuvassa 71*. Kuvasta havaitaan, että mitatut arvot ovat tietyllä syvyydellä kohtalaisen lähellä toisiaan, vaikka ne sisältävät havaintoja yli 1 km päästä toisistaan. Tämä tukee oletusta, jonka mukaan myös kauempana olevat näytteet edustavat penkereen alapuolista savea.



Kuva 71. Alueen saven vesipitoisuudet sekä kartiokokeesta määritetyt leikkauslujuudet.

Laboratoriokokeiden sekä muiden pohjatutkimusten perusteella voidaan päätellä, että kuivakuorikerroksen paksuus kyseisellä pehmeiköllä on noin 1,5...2 metriä. Kuvassa 72 on esitetty pehmeästä savikerroksesta 1,5 metrin syvyydestä alaspäin määritetyt tangenttimoduulimenetelmän normaalikonsolidoituneen osan parametrit m_v ja β_1 sekä niiden keskiarvot syvyyksittäin. Kuvasta havaitaan, että jännityseksponentti β_1 on kerroksen yläosassa lähellä nollaa, jolloin kokoonpuristuvuusindeksi kuvaa saven käyttäytymistä riittäväällä tarkkuudella. Syvemmällä osassa näytteitä ödometrikoikeesta määritetty β_1 on selvästi negatiivinen, jolloin kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä soveltuu huonommin. Suurimmat jännityslisäykset kohdistuvat kuitenkin kerroksen yläosiin, joten kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän käyttö painumalaskennassa on perusteltua.



Kuva 72. Alueen saven tangenttimoduulimenetelmän normaalikonsolidoituneen osan parametrit. Huom. keskiarvon laskennassa syvyys 5,5...8 m on yhdistetty yhdeksi kerrokseksi havaintojen vähyyden vuoksi.

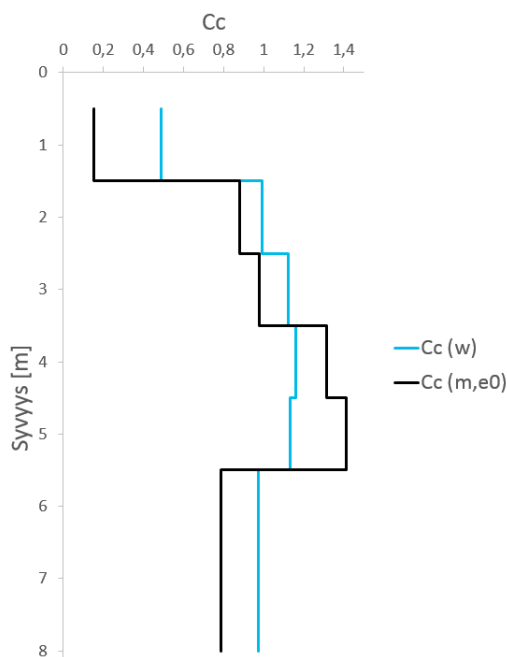
Kuvassa 73 on esitetty näytteistä määritetyt kokoonpuristuvuusindeksin C_c keskiarvot syvyyksittäin. Kokoonpuristuvuusindeksi on kuvassa määritetty kahdella eri tavalla: joko ödometrikokeen muodonmuutosmoduulin m ja luonnotilaisen huokosluvun e_0 avulla kappaleen 2.1.3 kaavalla (6), tai vesipitoisuuden perusteella kaavalla (31) (Länsivaara 2000, s. 39). Kuvasta havaitaan, että eri muunnosmalleilla saadaan erilaiset kuvaajat kokoonpuristuvuusindeksille. Tässä työssä painumalaskennassa on käytetty ödometrikokeen tuloksista määritettyä kokoonpuristuvuusindeksiä, koska se kuvaa saven painumakäyttäytymistä tarkemmin kuin vesipitoisuuteen perustuva likimääräismenetelmä.

$$C_c = k_c \sqrt{w^3} \quad (31)$$

missä

$k_c = 1,5$ on kerroin jonka vaihtelu on yleensä $0,5 < k_c < 1,5$
 w on vesipitoisuus [%]

Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmässä tarvittavan luonnontilaisen huokosluvun arvona käytettiin tässä työssä vesipitoisuuksien perusteella arvioituja keskiarvoja. Koelaskennassa kuivakuorikerroksen alkuhuokosluvun arvoksi on oletettu $e_0 = 1,5$ ja alapuolisen saven arvoksi $e_0 = 2,0$.



Kuva 73. Kokoonpuristuvuusindeksin keskiarvot syvyyksittäin. $Cc(w)$ = määritetty vesipitoisuuksien perusteella, $Cc(m,e0)$ = määritetty ödometrikokeiden perusteella.

Painumalaskentaan vaikuttaa oleellisesti myös savikerroksen konsolidaatiotila. Kuvassa 74 on esitetty koelaskentakohteen savesta ödometrikokeella määritetyt esikonsolidaatiojännitykset sekä näihin sovitettu suora. Kohteen savesta tehdyt ödometrikokeet ovat CRS-kokeita, joten esikonsolidaatiojännityksen arvot on redusoitu kokeiden muodonmuutosnopeuksien mukaisesti kaavoilla (32) (Vepsäläinen 1994, s. 3). Kuvassa on lisäksi mitattujen tilavuuspainojen perusteella laskettu vallitseva jännitys. Kuivakuorikerroksen alapinta ja pohjavedenpinta on kuvaajassa oletettu 1,5 metrin syvyyteen. Kuvaajasta on poistettu esikonsolidaatiojännityksen arvot, jotka ovat vallitsevan jännityksen alapuolella ja näin ollen määritetty selvästi häiriintyneistä näytteistä.

$$\sigma'_{p,lask} = \frac{\sigma'_{p,koe}}{k} \quad (32a)$$

$$k = \left(\frac{\dot{\epsilon}_{koe}}{\dot{\epsilon}_{lask}} \right)^{0,0728} \quad (32b)$$

Missä

$\sigma'_{p,lask}$ on laskennassa käytettävä esikonsolidaatiojännitys [kPa]

$\sigma'_{p,koe}$ on ödometrikokeen esikonsolidaatiojännitys [kPa]

$\dot{\epsilon}_{koe}$ on CRS-kokeen muodonmuutosnopeus [1/s]

$\dot{\epsilon}_{lask} = 10^{-7} \frac{1}{s}$ on muodonmuutosnopeus, jota vastaavaksi tulos redusoidaan

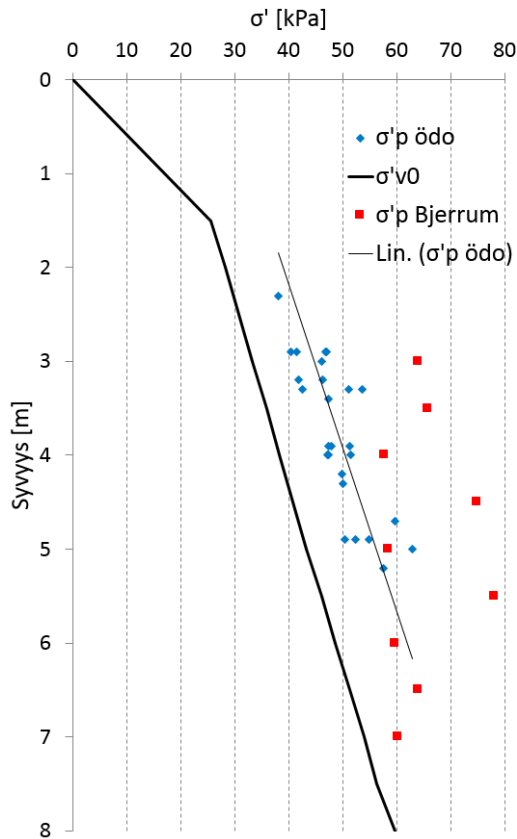
Esikonsolidaatiojännitystä voidaan arvioida myös suljetun leikkauslujuuden perusteella kaavalla (33) (Ratahallintokeskus 2005). Kaava (33) perustuu alun perin Bjerrumin (1961) kokoamaan aineistoon suljetun leikkauslujuuden ja esikonsolidaatiojännityksen yhteydestä. Kuvassa 74 on esitetty myös alueen redusoitujen siipikairaus tulosten keskiarvojen perusteella kaavalla (33) lasketut esikonsolidaatiojännitykset syvyyksittäin.

$$\sigma'_p = \frac{s_u}{\alpha} \quad (33)$$

missä

s_u on suljettu leikkauslujuus [kPa]

α on saven plastisuusluvusta riippuva kerroin, tässä $\alpha = 0,25$



Kuva 74. Alueen saven vallitseva jännitys ja esikonsolidaatiojännitys.

Kuvasta 74 havaitaan, että ödometrikokeiden perusteella alueen savi on lievästi ylikonsolidoitunutta, ylikonsolidaation ollessa noin 10...20 kPa. Bjerrumin menetelmällä arvioituna savi on tätä voimakkaammin ylikonsolidoitunutta.

Kun ödometrikoe tehdään CRS-kokeena kohtalaisen suurella muodonmuutosnopeudella, saadaan kokeesta yleensä todellista suurempi esikonsolidaatiojännityksen arvo (Vepsäläinen 1994). Tämä kuitenkin huomioidaan, kun esikonsolidaatiojännitys redusoidaan kaavoilla (32). Nykyisellä näytteenottotekniikalla ei kuitenkaan ole mahdollista saada täysin häiriintymättömiä näytteitä, ja näin ollen ödometrikokeella määritetty esikonsolidaatiojännitys usein toisaalta aliarvioi todellista in-situ esikonsolidaatiojännitystä (Lunne et al. 2008). Tästä johtuen koelaskennassa on käytetty saven ylikonsolidaation (POP) arvona hieman ödometrikokeilla määritetyn ylikonsolidaation keskiarvoa suurempaa arvoa, 20 kPa.

Ylikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksin C_r arvona käytettiin laskelmissa yksinkertaistuksen vuoksi likimain 0,1-kertaista arvoa normaalikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksiin C_c nähden. Laskelmissa kuivakuorikerroksen ylikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksin arvoksi asetettiin $C_r = 0,01$ ja alapuolisella savella vastaava arvo on $C_r = 0,1$.

5.3 Parametrien hajonta

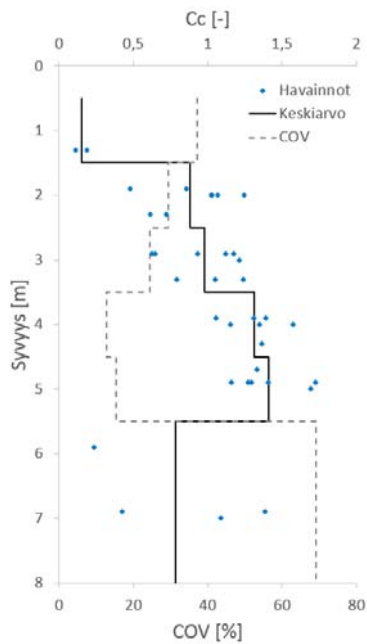
Painumalaskelmissa käytetään usein näytteistä määritettyjen parametrien keskiarvoja kussakin kerroksessa. Näin laskemalla saadaan tulokseksi yksi absoluuttinen painumakuvaaja, jonka luotettavuutta ei kuitenkaan pystytä kvantitatiivisesti arvioimaan. Työssä toteutetussa painumalaskentamootorissa käytetään oletuksena tämän tyyppistä determinististä laskentaa.

Vaihtoehtoisesti laskennassa voidaan käyttää luotettavuuteen perustuvan suunnittelun menetelmiä, jolloin laskennan lähtötietona annetaan parametrien keskiarvot, jakaumat ja hajontaluvut. Tällöin laskenta voidaan tehdä niin kutsutulla Monte Carlo -simuloinnilla, jossa laskenta suoritetaan useaan otteeseen ja jokaisessa laskennassa laskentaparametrit luodaan uudelleen käyttäen annettuja jakaumia ja jakaumien tunnuslukuja. Näin laskettaessa tulokseksi saadaan painumien todennäköisyysjakaumia. Tämän työn koelaskennassa tehtiin yksinkertaistettua Monte Carlo -simulointia varioimalla laskennassa käytettyjä kokoonpuristuvuusindeksejä, ylikonsolidaatiota sekä kuivakuoren alapinnan tasoa. (Löfman 2016, s. 19-20; Phoon 2008, s. 5-6).

Parametrien hajontalukuna käytetään yleensä variaatiokerrointa (COV, ”coefficient of variation”), joka lasketaan kaavalla (34). *Kuvassa 75* on esitetty koelaskentakohteen savesta määritetyt kokoonpuristuvuusindeksit sekä niiden keskiarvot ja variaatio kertoimet metrin kerroksin. Tiedot on esitetty myös *Taulukossa 13*. Syvyydet 5,5...8 m on yhdistetty yhdeksi kerrokseksi havaintojen vähyyden vuoksi.

$$COV = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \approx \frac{SD_x}{\bar{x}} \quad (34)$$

missä	σ_x	on satunnaismuuttujan x keskihajonta
	μ_x	on satunnaismuuttujan x odotusarvo
	SD_x	on satunnaismuuttujan x otoskeskihajonta
	\bar{x}	on satunnaismuuttujan otoskeskiarvo



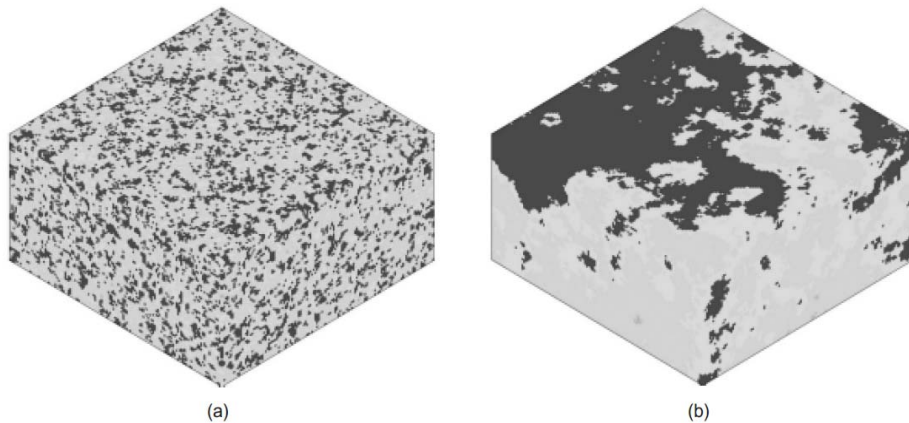
Kuva 75. Alueen savesta määritetty C_c , kerroskohtaiset keskiarvot ja COV-kertoimet.

Taulukko 13. Alueen saven kokoonpuristuvuusindeksin vaihtelu.

Syvyys [m]	0,5-1,5	1,5-2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5	5,5-8
n	2	8	9	7	7	4
k.a.	0,15	0,88	0,98	1,31	1,41	0,78
SD	0,06	0,26	0,24	0,17	0,22	0,54
COV	37 %	29 %	24 %	13 %	15 %	69 %
min.	0,11	0,48	0,62	1,05	1,16	0,24
max	0,19	1,25	1,24	1,57	1,73	1,39

Havaitaan, että syvyydellä 1,5...5,5 m, missä havaintoja on hieman enemmän, variaatiokerroin on hieman 20 %:n molemmiin puolin. Müllerin (2013, s. 72) mukaan kansainvälinen suositus kokoonpuristuvuusindeksin variaatiokertoimeksi on 30 %. Löfman (2016, s. 68) puolestaan päätyi diplomityössään suomalaisilla savilla kokoonpuristuvuusindeksin variaatiokertoimen suositukseksi hieman suurempaan arvoon, 40 %. Nämä tutkimukset perustuvat huomattavasti laajempaan aineistoon kuin tämän työn koelaskentakohteesta tehdyt laboratoriokokeet. Koelaskentakohteen havaintojen vähyydestä johtuen tämän työn laskelmissa on käytetty kokoonpuristuvuusindeksin variaatiokertoimen arvona $COV = 40 \%$.

Maaparametrien vaihtelun mallintamisessa tarvitaan keskiarvojen ja hajontalukujen lisäksi tieto vaihtelun korrelaation pituudesta (engl. "scale of fluctuation"). Korrelaation pituus kuvaa etäisyyttä, jonka sisällä parametrien arvot riippuvat merkittävästi toisistaan. Korrelaation pituus määritetään yleensä erikseen vaak- ja pystysuunnissa. Kuvassa 76 on havainnollistettu korrelaation pituuden merkitystä maaparametrien paikallisen vaihtelun mallintamisessa. Kun jakaumien tunnusluvut sekä korrelaation pituudet tiedetään, voidaan muodostaa niin kutsuttu satunnaisten arvojen elementtiverkko (engl. "random fields"), ja suorittaa laskenta jakaumien ja korrelaatioiden pituuksien mukaisesti satunnaisilla parametreilla. (Jaksa et al. 2005, s. 110).



Kuva 76. Jonkin maaparametrin vaihtelu maablokissa. a) Pieni korrelaation pituus, b) suuri korrelaation pituus. (Jaksa et al. 2005, s. 111).

Koska työn painopiste oli enemmänkin tietomallia hyödyntävän laskentamoottorin toteuttamisessa, korrelaation pituuksia ei tässä työssä varsinaisesti määritetty havainnoista. Koelaskennan Monte Carlo -simuloinnissa kokoonpuristuvuusindeksin korrelaation pituus toteutettiin yksinkertaistetusti siten, että savikerros jaettiin syvyysvälillä 1,5...5,5 m yhden metrin paksuisiksi osakerroksiksi, joiden sisällä olevilla pisteillä on kullakin simulaatiokerralla samat parametrit. Maaparametrit korreloivat näin ollen laskelmassa täydellisesti keskenään syvyysuunnassa metrin kerrosten sisällä, mutta eivät lainkaan kerrosten välillä. Horisontaalinen korrelaation pituus on laskennassa äärettömän suuri eli parametrilla ei ole horisontaalista vaihtelua.

Täydellisen ”random fields” -periaatetta noudattavan laskennan toteuttaminen ei työn laajuuden rajoissa ollut mahdollista. Laskentamoottorilla on kuitenkin mahdollista mallintaa maaparametrien vaihtelu tarkemmin, koska moottorissa voidaan antaa jokaiselle laskentapisteelle parametrit erikseen. Parametrien anto tapahtuu moottorissa siten, että maaparametrifunktioilla määritetään arvot kullekin kolmiulotteisten maaparametrimatriisien alkiolle. Tarkemman parametrien vaihtelun mallintaminen vaatii kuitenkin kohtalaisen laajat maaparametrifunktiot.

5.4 Koelaskennan tulokset

5.4.1 Deterministinen laskenta

Ensimmäisessä koelaskennassa testattiin laskentamoottorin toimintaa perinteisellä deterministisellä menetelmällä, jossa painumaparametrit annetaan vakiona kussakin kerroksessa. Tämä tehtiin antamalla kullekin laskentapisteelle painumaparametrit eli laskentapistematriisien **P7** ja **P9...P11** alkiolle arvot riippuen kuivakuorikerroksen alapinnan sijainnista sekä laskentapisteen z-koordinaateista seuraavasti:

- POP-matriisi P7:
 - Kaikkien laskentapisteen ylikonsolidaatio POP eli kaikkien matriisin alkioiden arvo on 20 kPa.

- C_c -matriisi P₉:
 - kun piste on kuivakuoren alapinnan yläpuolella tai sen kohdalla, $C_c = 0,1$
 - kun piste on pystysuunnassa 0...1 m kuivakuoren alapuolella, $C_c = 0,88$
 - kun piste on pystysuunnassa 1...2 m kuivakuoren alapuolella, $C_c = 0,98$
 - kun piste on pystysuunnassa 2...3 m kuivakuoren alapuolella, $C_c = 1,31$
 - kun piste on pystysuunnassa 3...4 m kuivakuoren alapuolella, $C_c = 1,41$
 - kun piste on pystysuunnassa yli 4 m kuivakuoren alapuolella, $C_c = 0,78$
- e_0 -matriisi P₁₀:
 - kun piste on kuivakuoren alapinnan yläpuolella tai sen kohdalla, $e_0 = 1,5$
 - kun piste on kuivakuoren alapuolella, $e_0 = 2,0$
- C_r -matriisi P₁₁:
 - kun piste on kuivakuoren alapinnan yläpuolella tai sen kohdalla, $C_r = 0,01$
 - kun piste on kuivakuoren alapuolella, $C_r = 0,1$

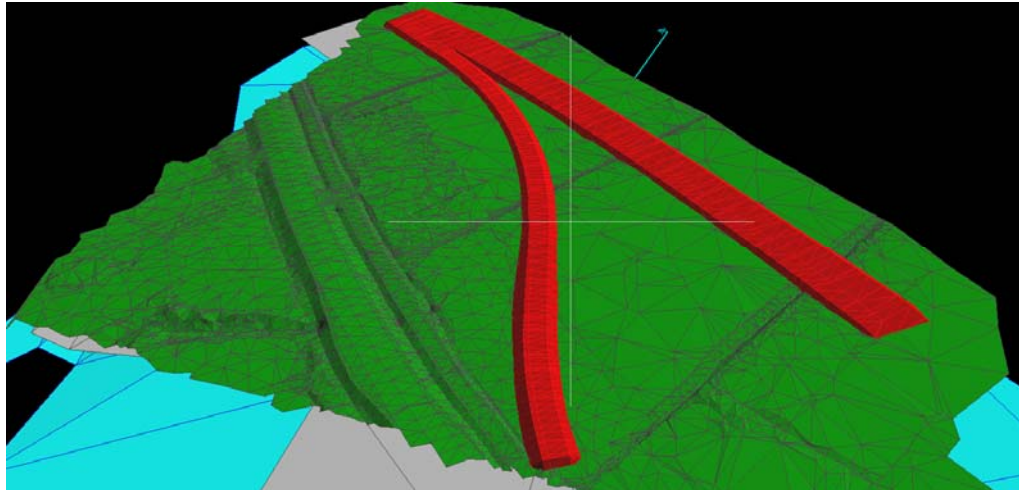
Kokoonpuristuvuusindeksin C_c arvot noudattavat *Taulukon 13* keskiarvoja. Lopuksi C_c - ja C_r -matriiseista etsittiin pisteet, jotka ovat maanpinnan yläpuolella tai saven alapinnan alapuolella, ja asetettiin kyseiset alkiot nolllaksi. Edellä esitetyt määrittymiset toteuttavat maaparametrien funktiot ovat Liitteessä 1. PP-moottorin tuottamat laskentatulosteet ovat Liitteenä 4. Yhteenveto laskennan maaparametreista on esitetty *Taulukossa 14*.

Taulukko 14. Deterministisen laskennan maaparametrit.

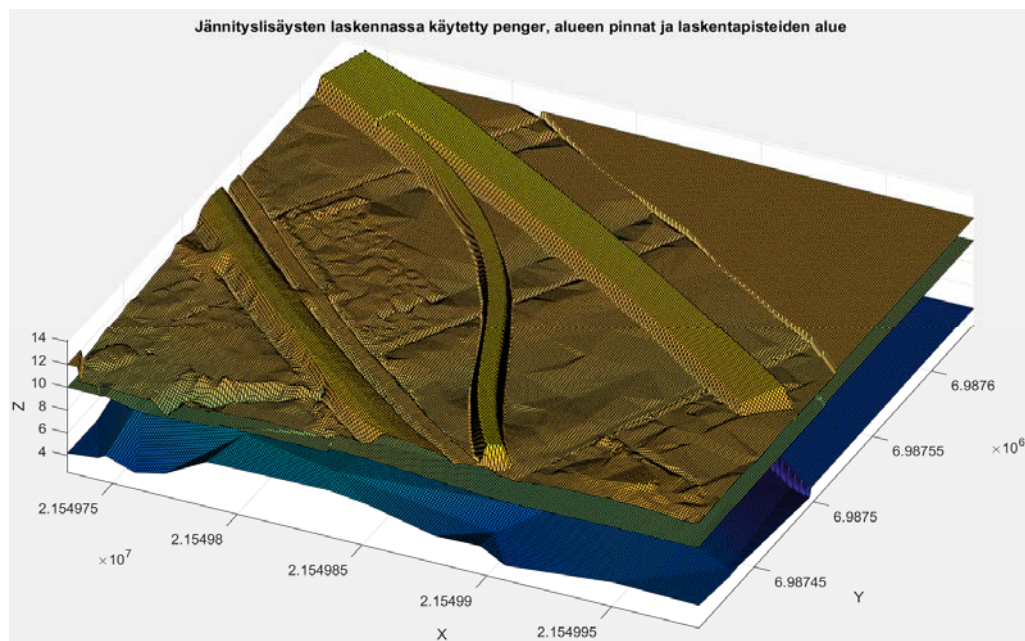
Kerros	C_c [-]	C_r [-]	e_0 [-]	POP [kPa]	γ [kN/m ³]
Penger	-	-	-	-	20
Kuivakuori	0,1	0,01	1,5	20	17
Savi 1	0,88	0,1	2	20	15
Savi 2	0,98	0,1	2	20	15
Savi 3	1,31	0,1	2	20	15
Savi 4	1,41	0,1	2	20	15
Savi 5	0,78	0,1	2	20	15

3D-havainnollistus tietomallin pinnoista on esitetty *Kuvassa 77*. Laskentamoottorin tulkitsemat 3D-pinnat on esitetty *Kuvassa 78*. Kuvia vertaamalla voidaan todeta, että laskentamoottori laskee pintojen z-koordinaatit kussakin x, y -kohdassa oikein.

Alueella, jossa tietomalli ei sisällä kolmioita, kukin pinta näkyy *Kuvassa 78* tasaisena. Tämä johtuu siitä, että kunkin pinnan *.txt tiedostoon on manuaalisesti lisätty yksi ylimääräinen kolmio tiettyyn tasoon. Tämä ei kuitenkaan vaikuta penkereen alapuolisten painumien laskentaan, koska kyseisellä alueella ei ole pengerkuormaa. Nykyinen tie ei myöskään ole laskennassa kuormana, sillä se on osa nykyistä maanpintaa. Laskennassa ei ole kaivupintaa, koska esikuormituspenkereen alta on poistettu ainoastaan pintamaat.

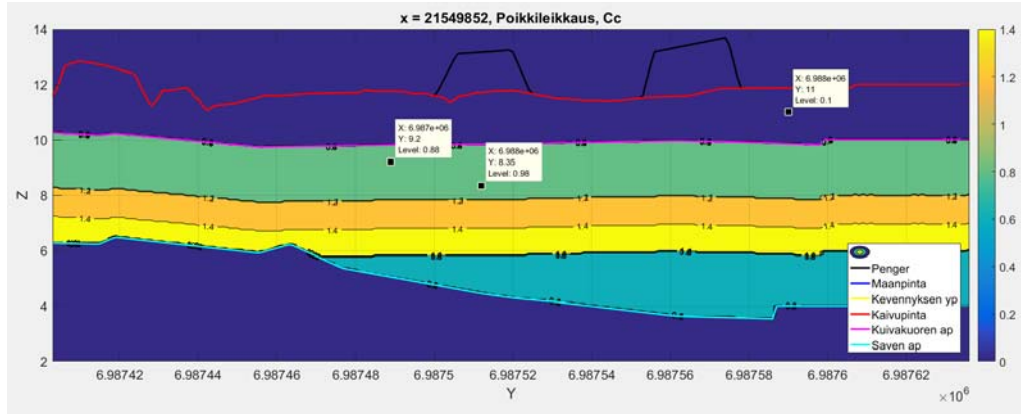


Kuva 77. Laskentamoottoriin sisäänluetut kolmiopinnat.



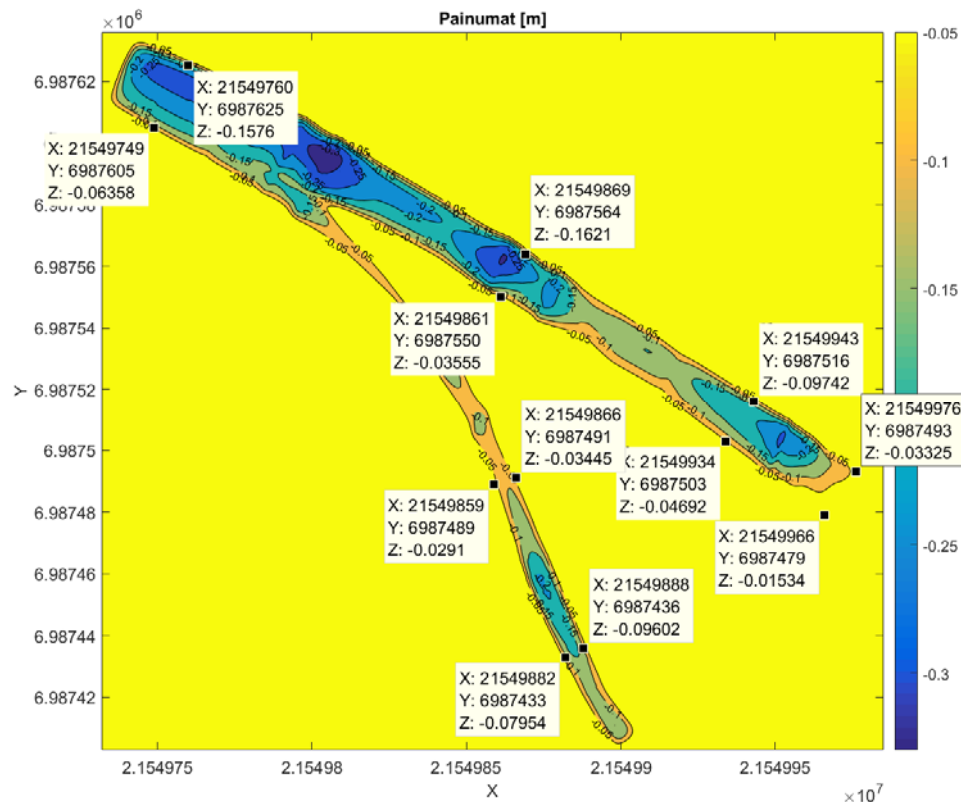
Kuva 78. Laskentamoottorin tulkitsemat pinnat. Huom. z-akselin mittakaava on viisinkertainen muihin akseleihin nähden.

Kuvassa 79 on y-z -tason suuntainen leikkaus keskeltä laskenta-alueen x-akselia. Kuvassa on esitetty myös laskentaan annetut C_c :n arvot. Kuvasta havaitaan, että kokoonpuristuvuusindeksin arvot kerroksittain on laskennassa mallinnettu edellä esitetyllä tavalla.

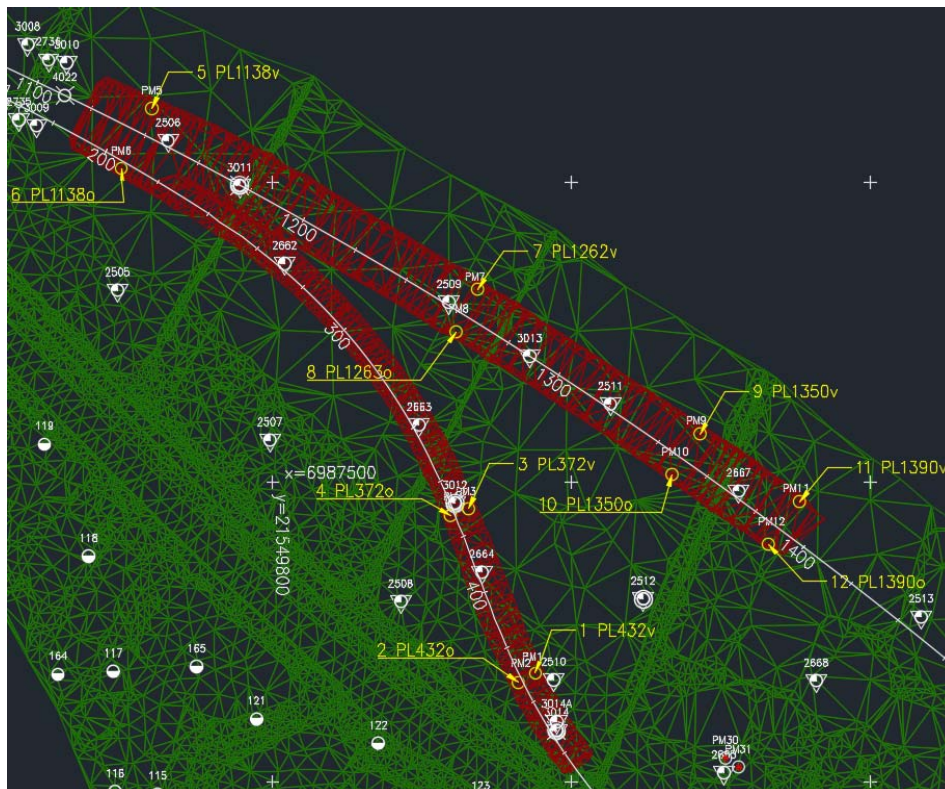


Kuva 79. Poikkileikkaus x-akselin puolivälistä, C_c :n arvot. Kuvassa on esillä arvot datapisteistä, joissa arvo ei selviä väriskaalauksesta. Kuivakuorikerros: $C_c=0,1$, Vihreässä kerroksessa ylempi: $C_c=0,88$ ja alempi: $C_c=0,98$.

Tasa-arvokäyrästä laskennan tuloksena saatavasta painumamatriisista S on esitetty Kuvassa 80. Kuvassa on esitettynä myös matriisin alkiodien arvot kohdissa, joissa todellisen esikuormituspenkereen painumatangot likimain sijaitsevat. Tankojen rakennussuunnitelman mukaiset sijainnit sekä esikuormituspenkereen ja maanpinnan kolmiopinnat on esitetty Kuvassa 81. Kuvasta 80 havaitaan, että laskennallinen painuma vaihtelee epätasaisesti myös penkereen pituussuunnassa. Poikkileikkauksittain laskettu painuma voi näin ollen vääristää esimerkiksi arvioituja kaltevuuden muutoksia.



Kuva 80. Painumamatriisin S visualisointi, painumien tasa-arvokäyrät ja arvot painumatankojen kohdalla.

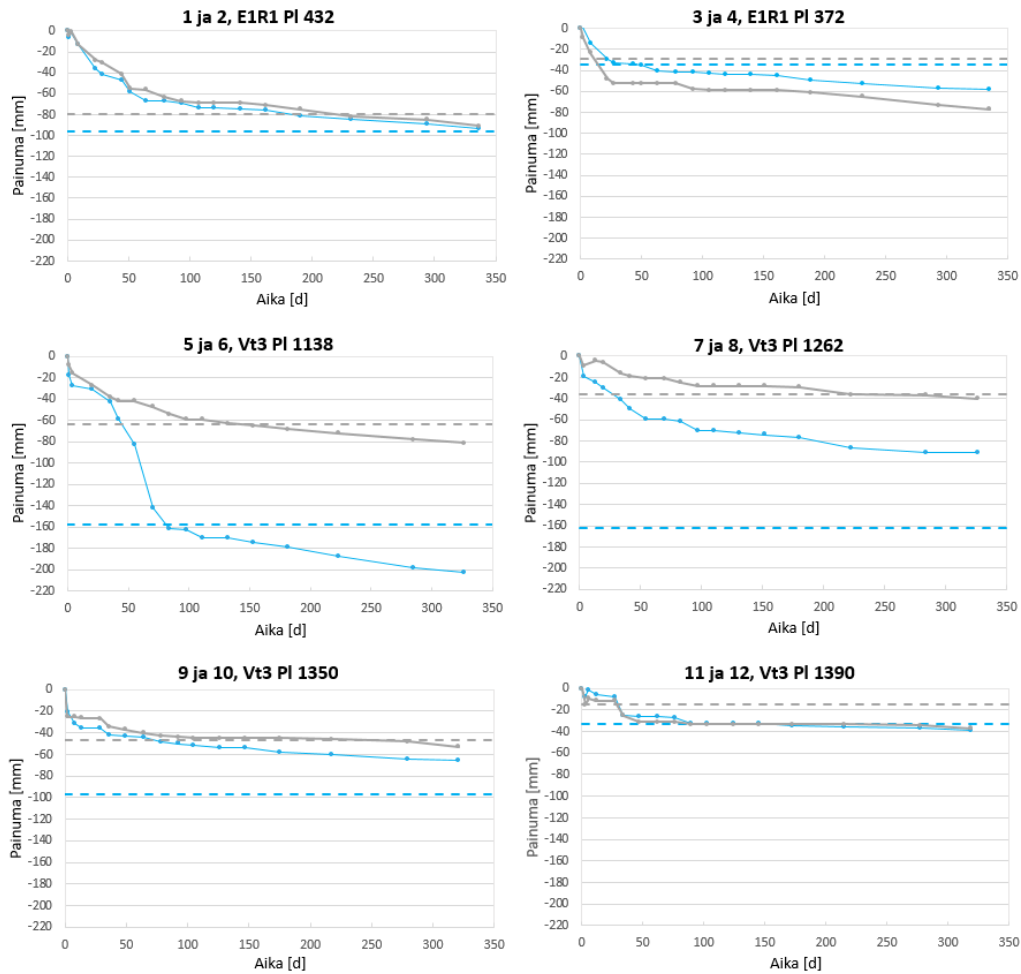


Kuva 81. Rakennussuunnitelman mukaiset painumatankojen sijainnit.

Kuvassa 82 on esitetty painumatankojen kohdalta lasketut painumat sekä tankojen mitatut painumat paaluittain. Kuvassa jatkuvat viivat kuvaavat mitattuja painumia ja katkoviivat PP-moottorilla laskettuja primaarikonsolidaation loppuarvoja. Siniset viivat ovat paalusuuntaan nähden vasemmalla puolella olevien tankojen painumia, ja harmaat vastaavasti oikean puolen tankojen painumia.

Kuvan 82 toteutuneiden painumien kuvaajista havaitaan, että painuminen jatkuu vähäisesti edelleen kaikissa mittauspisteissä. Vähintäänkin osa meneillään olevasta liikkeestä lienee kuitenkin luonteeltaan savikerroksen hiipumaa eli sekundaari-painumaa. Likimääräisesti voitaneen arvioida, että viimeisimmät mittaustulokset edustavat primaarikonsolidaation loppuarvoja, tai ovat ainakin melko lähellä niitä.

Kuvan 82 perusteella painumatankojen kohdalla lasketut primaarisen konsolidaation loppuarvot vastaavat toteutuneita painumia melko hyvin. Pääsääntöisesti lasketut painumat vaikuttaisivat kuitenkin olevan hieman toteutuneita pienempiä. Tämä saattaa johtua sekundaaripainuman huomiotta jättämisestä, laskennassa käytetyn ylikonsolidaation hieman liian suuresta arvosta 20 kPa, tai kuivakuoren alapinnan virheellisestä tulkinnasta ja mallintamisesta. Pieni virhe aiheutuu myös siitä, että laskennassa on käytetty kokoonpuristuvuusindeksimenetelmää, vaikka ödometrikokeiden perusteella saven jännityseksponentti on osassa savikerrosta negatiivinen.



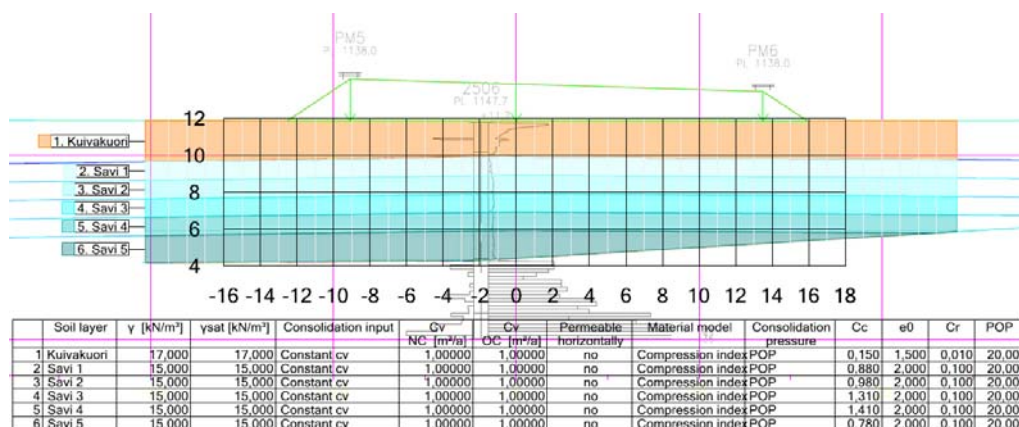
Kuva 82. Lasketut ja toteutuneet painumat. Katkoviivat = laskettu primaari-konsolidaation loppuarvo, jatkuvat viivat = toteutuneet painumat. Harmaa = mittalinjan oikean puolen tangot, sininen = vasemman puolen tangot.

Painumatangon 7 kohdalla laskettu painuma on huomattavasti suurempi kuin toteutunut. Tämä johtunee siitä, että kyseinen piste osuu maastomallissa olevan pienen syvennyksen kohdalle lähelle olemassa olevaa ojaa (Kuva 83). Näin ollen laskennallisesti tuloksena saadaan korostunut painuma johtuen kappaleessa 4.3.4 käsitellystä virhemahdollisuudesta ojien ja syvennyksien mallintamisessa. Mahdollisesti maanpinnan malli on myös tässä kohdassa epätarkka. Ojan läheisyys vaikuttaa hieman myös painumatangon 9 kohdalla, missä laskettu painuma on niin ikään toteutunutta hieman suurempi.

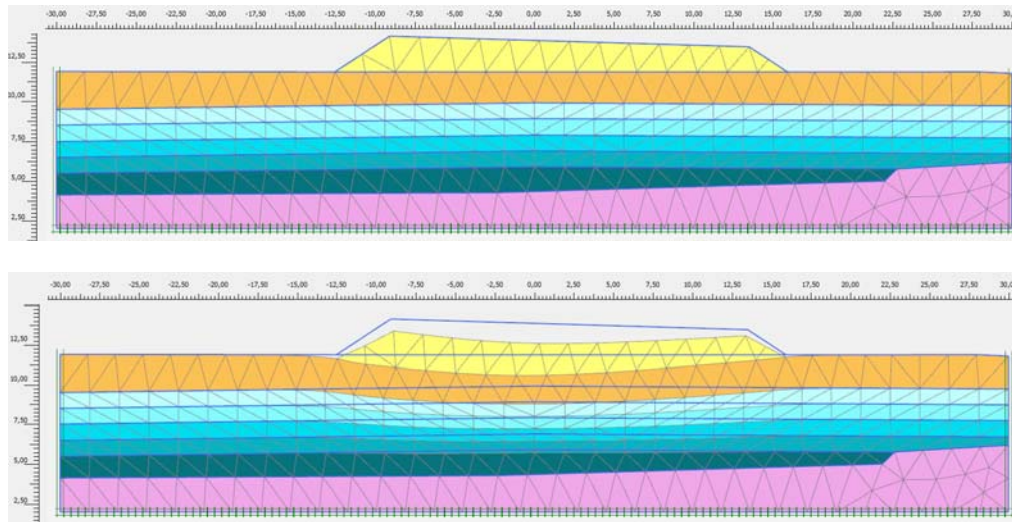


Kuva 83. Maastomallin korot painumatangon 7 kohdalla.

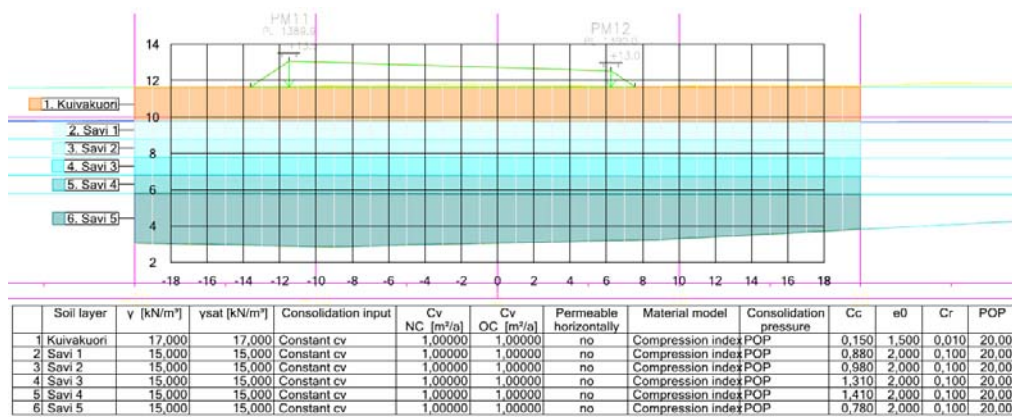
Seuraavassa on esitetty vertailulaskelmat poikkileikkauksista painumatankojen 5 ja 6 sekä 11 ja 12 kohdalta GeoCalc- ja PLAXIS 2D-ohjelmilla. 2D-laskentamallit kyseisistä poikkileikkauksista on esitetty Kuvissa 84...87. Vertailulaskelmissa käytettiin samoja maaparametreja kuin PP-moottorin laskennassa. Maakerrosrajat on laskentamalleissa määritetty mallinnusohjelmasta tulostetusta poikkileikkauksesta, jolloin kerrosrajat noudattavat tietomallin pintojen muotoja kyseisten leikkausten kohdalla. Savikerroksen sisäinen kerrosjako on muodostettu monistamalla kuivakuoren alapintaa, jotta laskentamalli vastaa PP-moottorin kerrosjakoa. PLAXIS 2D-ohjelmassa saven alapuolelle lisättiin painumaton kerros, jotta mallin alareuna saatiin vaakasuoraksi.



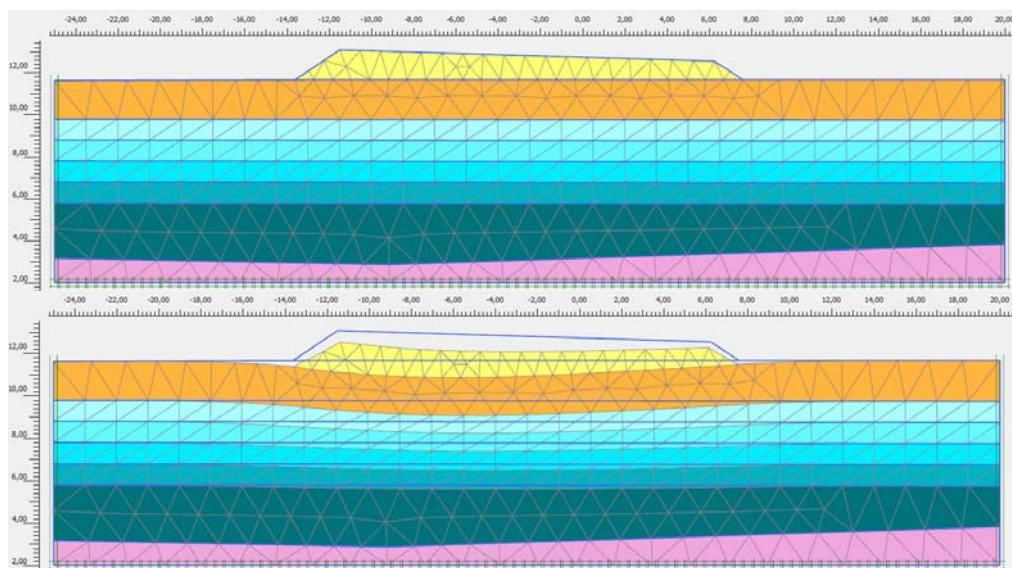
Kuva 84. GeoCalc-laskentamalli, 5 ja 6 Vt3 PL 1138.



Kuva 85. PLAXIS 2D –laskentamalli ja deformatunut elementtiverkko, 5 ja 6 Vt3 Pl 1138. Siirtymät skaalattu viisinkertaiseksi. Maksimi siirtymä 0,257 m.



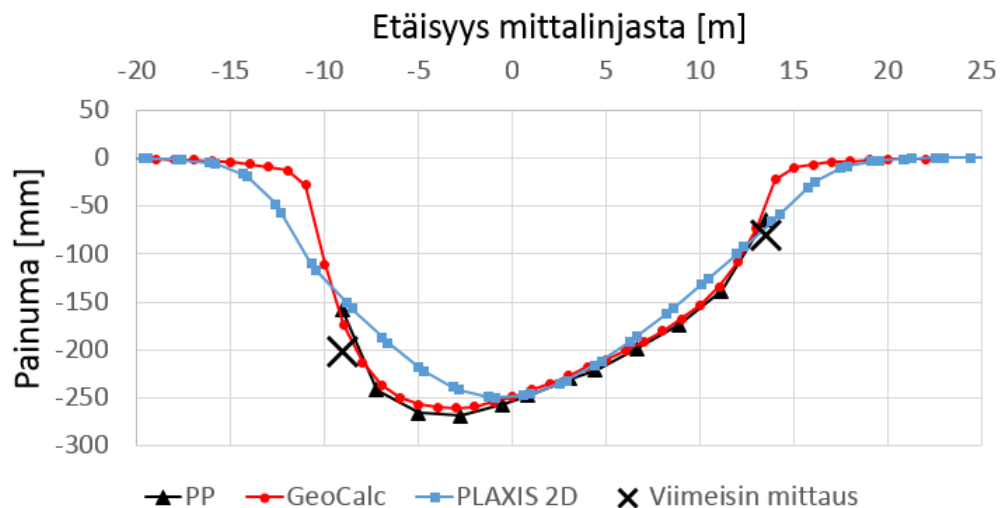
Kuva 86. GeoCalc-laskentamalli, 11 ja 12 Vt3 Pl 1390.



Kuva 87. PLAXIS 2D –laskentamalli ja deformatunut elementtiverkko, 11 ja 12 Vt3 Pl 1138. Siirtymät skaalattu 20-kertaiseksi. Maksimi siirtymä 0,040 m.

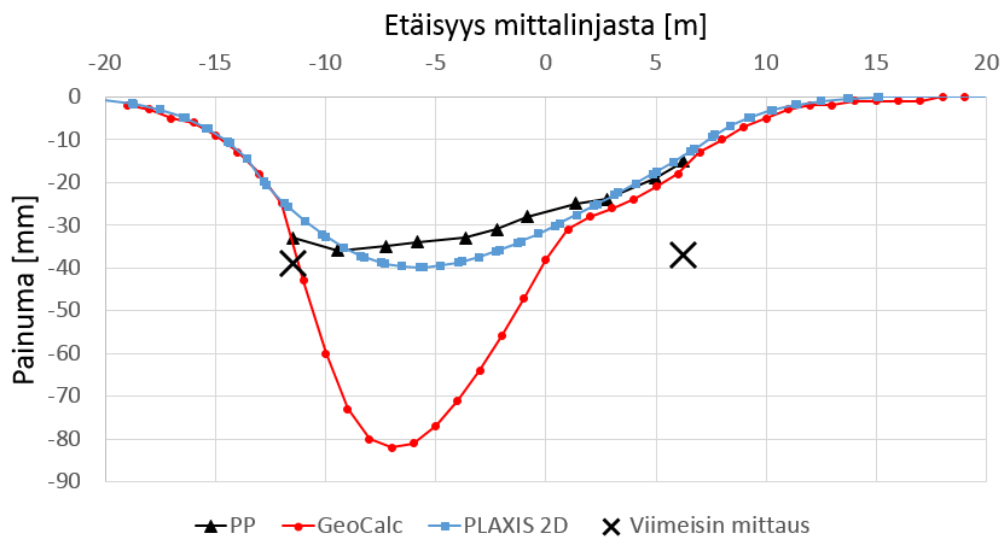
Painumakuvaajat eri laskentaohjelmilla, sekä viimeisimpien painumamittausten arvot poikkileikkauksessa painumatankojen 5 ja 6 kohdalta on esitetty *Kuvassa 88*. Kuvasta havaitaan, että PP- ja GeoCalc-laskennassa painumakuvaajat ovat lähes yhtenevät. PLAXIS 2D-laskelman painumakuvaaja on hieman laakeampi.

Tässä tapauksessa kuormituksen kolmiulotteisuus ei vaikuta merkittävästi laskettuihin painumiin, sillä kyseinen poikkileikkaus on riittävän etäällä penkereen reunasta, ja kuormitustilanne sekä maaperägeometria säilyvät likimain vakiona riittävän pitkällä matkalla penkereen pituussuunnassa. Lisäksi, mikäli viimeisimpien painumamittaus-tulosten tulkitaan olevan lähellä primaarikonsolidaation loppuarvoja, voidaan todeta, että kaikilla ohjelmilla lasketut painumat vastaavat painumatankojen kohdalla toteutuneita painumia hyvin. Toteumamittauksia on kuitenkin tehty vain penkereen reunoilta, joten tarkkaa tietoa toteutuneesta painumaprofiilin muodosta ei ole.



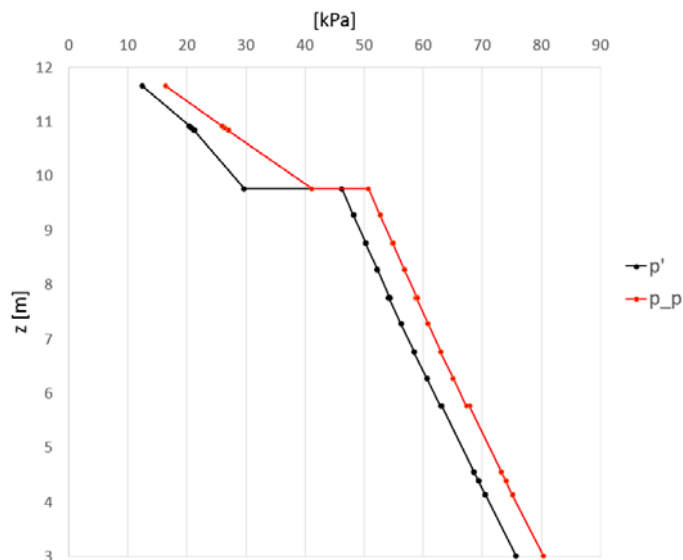
Kuva 88. Lasketut ja toteutuneet painumat poikkileikkauksessa painumatankojen 5 ja 6 kohdalla.

Vastaavat kuvaajat painumatankojen 11 ja 12 kohdalla on esitetty *Kuvassa 89*. Kuvasta havaitaan, että tässä poikkileikkauksessa GeoCalc-laskennan tuloksena saadaan muita ohjelmia huomattavasti suurempia painumia mittalinjan vasemmalla puolella, missä penger on korkeimmillaan. Tässä tapauksessa GeoCalc-laskennassa penkereen vasemmalla puoliskolla pohjamaahan aiheutuva jännitys ylittää esikonsolidaatiojännityksen, kun taas oikealla penkereen matalammalla puolella esikonsolidaatiojännitys ei ylity. PP-moottorilla laskettaessa esikonsolidaatiojännitys ylittyy vasemmalla puoliskolla vain pienessä osassa laskentapisteitä, jotka nekin ovat kuiva-kuorikerroksessa lähellä maanpintaa. Kun laskennassa huomioidaan kolmiulotteinen kuormitus, laskentapisteisiin aiheutuu kuormasta pienempiä jännityslisäyksiä, koska kyseinen leikkaus on penkereen päädyssä ja kuormitus ei jatku pituussuunnassa. Tästä johtuen PP-moottorilla laskettu painumakuvaaja on huomattavasti tasaisempi.



Kuva 89. Lasketut ja toteutuneet painumat poikkileikkauksessa painumatankojen 11 ja 12 kohdalla.

Myöskään PLAXIS 2D-laskennassa esikonsolidaatiojännitys ei ylity, vaikka geometrian oletetaan laskentamallissa jatkuvan samana poikkileikkausta vastaan kohtisuorassa suunnassa. PLAXIS 2D-ohjelmalla voidaan antaa parametrina pystysuuntaisen jännityksen POP-arvo, joka on tässä 20 kPa. Ohjelmassa kuitenkin käytetään laskennallisesti esikonsolidaatiojännityksen mallintamisessa vastaavaa isotrooppista esikonsolidaatiojännitystä p_p^{eq} , kun ohjelmassa määritetään alkutilanteen myötöpinnan laajuus (PLAXIS 2016b, s. 174-175). Kuvassa 90 on esitetty laskennan lopputilanteen hydrostaattinen jännitys p' sekä esikonsolidaatiojännitys p_p syvyyden funktiona suurimpien painumien kohdalta. Kuvasta havaitaan, että hydrostaattinen jännitys on kaikilla syvyyksillä pienempi kuin esikonsolidaatiojännitys, joten muodonmuutokset tapahtuvat elastisella alueella. Tästä johtuen PLAXIS 2D-laskelman painumakuvaaja on lähempänä PP-laskelman kuvaajaa kuin GeoCalc-laskelman kuvaajaa, vaikka PLAXIS 2D-laskennassa oletetaan kuormitusgeometria jatkuvaksi.



Kuva 90. PLAXIS 2D-laskelman hydrostaattinen jännitys ja esikonsolidaatiojännitys suurimpien painumien kohdalta.

Kuvan 89 painumakuvaajista havaitaan, että vasemmalla puolella kaikki laskelmat vastaavat mitattua painumaa hyvin. Oikealla puolella kaikilla ohjelmilla lasketut painumat ovat toteutunutta pienempiä. Tämän tyyppisessä rajatapauksessa, jossa jännitys kuormituksen alaisena on hyvin lähellä esikonsolidaatiojännitystä, korostuu oikean esikonsolidaatiojännityksen arvon määrittäminen. Penkereen päädyistä tehdyn laskelman perusteella voidaan kuitenkin päätellä, että erityisesti tapauksissa, jossa pengerkuorma pienenee pituussuunnassa, GeoCalc-poikkileikkauslaskennan kuorman aiheuttamat pystyjännityslisäykset ovat liian suuria.

Determinististen laskelmien yhteenvedona todettakoon vielä, että pääsääntöisesti kyseisillä parametreilla tehty primaarikonsolidaation loppuarvojen laskelmat vastaavat viimeisimpiä painumamittaustuloksia melko hyvin. Toteutuneet painumat ovat kuitenkin hieman laskettuja painumia suurempia. Tämä saattaa johtua aavistuksen liian suuresta POP-arvosta laskennassa. *Kuvasta 82* on havaittavissa, että painuminen jatkuu vähitellen edelleen. Tästä ainakin osa lienee kuitenkin sekundaaripainumaa, jota ei laskelmissa huomioitu. Laskelmien ja painumakuvaajien perusteella voitaneen arvioida, että primaarinen konsolidaatio on kohteen esikuormituspenkereen alla päättynyt, tai ainakin lähellä päättymistä. Sekundaaripainuma kuitenkin jatkuu edelleen.

Kuormituksen kolmiulotteisuus ei laskelmien perusteella vaikuta merkittävästi laskettuihin painumiin lukuun ottamatta aivan penkereen päädyistä tehtyä laskentaa. Lisäksi koelaskentakohteessa maaperän rajapinnat ovat koko alueella melko tasaisia, joten myöskään maaperägeometrian kolmiulotteisuus ei tässä tapauksessa vaikuta merkittävästi laskettuihin painumiin.

5.4.2 Tilastollinen laskenta Monte Carlo –simuloinnilla

Painumatankojen laskennallisia painumia tarkasteltiin myös tilastollisilla menetelmillä. Laskenta suoritettiin PP-moottorilla useaan otteeseen siten, että maan kerroksittaisia normaalikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksejä C_c , laskennassa käytettyä ylikonsolidaation POP arvoa, sekä kuivakuoren alapinnan tasoa varioitiin antamalla kerroskohtaiset kokoonpuristuvuusindeksit, kaikkien kerrosten ylikonsolidaatio sekä kuivakuoren alapinnan taso tilastollisina jakaumina. Laskelmat tehtiin neljällä eri tavalla: varioimalla kokoonpuristuvuusindeksejä, ylikonsolidaatiota, kuivakuoren alapinnan tasoa tai kaikkia samanaikaisesti.

Ensimmäisessä laskennassa varioitiin ainoastaan kokoonpuristuvuusindeksejä. Kerroksittaisten kokoonpuristuvuusindeksien oletettiin noudattavan log-normaali-jakaumaa, jotta laskennassa välttyttiin satunnaisilta negatiivisilta arvoilta. Löfman (2016, s. 99) päätteli myös diplomityössään, että log-normaali-jakauma soveltuu kokoonpuristuvuusindeksin jakaumaksi parhaiten. Kunkin kerroksen kokoonpuristuvuusindeksin log-normaali-jakauman parametrit laskettiin kaavoilla (35), ja kullakin simulaatiokerralla luotiin jakaumista kunkin kerroksen kokoonpuristuvuusindeksiksi satunnainen arvo MATLABin valmiilla satunnaislukugeneraattorilla (MathWorks 2017). Simulaatiokertojen määrä laskennassa oli $n = 1000$. Jakaumien parametrit on esitetty *Taulukossa 15*. Muut maaparametrit olivat deterministisen laskelman mukaiset.

$$\mu_{ln} = \ln \left(\frac{\bar{x}^2}{\sqrt{v + \bar{x}^2}} \right) \quad (35a)$$

$$\sigma_{ln} = \sqrt{\ln\left(\frac{v}{\bar{x}^2} + 1\right)} \quad (35b)$$

missä

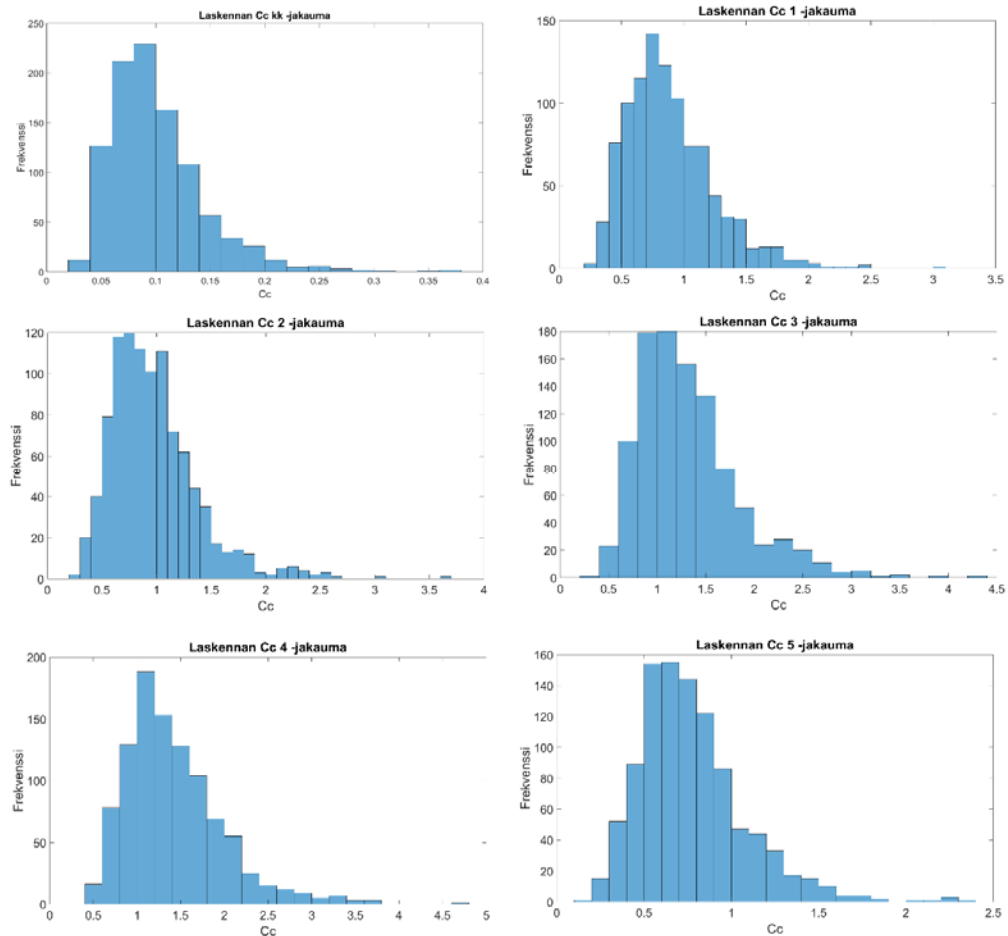
μ_{ln}, σ_{ln} ovat log-normaalijakauman parametrit
 \bar{x} on ko. kerroksen kokoonpuristuvuusindeksi havaintojen keskiarvo
 $v \approx SD_x^2 = (COV \cdot \bar{x})^2$ on kokoonpuristuvuusindeksin varianssi

Taulukko 15. Jakaumien parametrit, kun varioitiin vain kokoonpuristuvuusindeksiä.

	Cc	POP	Kuivakuoren alapinta
Jakauma	log-norm	vakio, 20 kPa	vakio, mallin mukainen
Virhetermin jakauma	-	-	-

Kerros	Cc (k.a.)	COV
Kuivakuori	0,1	40 %
Savi 1	0,88	40 %
Savi 2	0,98	40 %
Savi 3	1,31	40 %
Savi 4	1,41	40 %
Savi 5	0,78	40 %

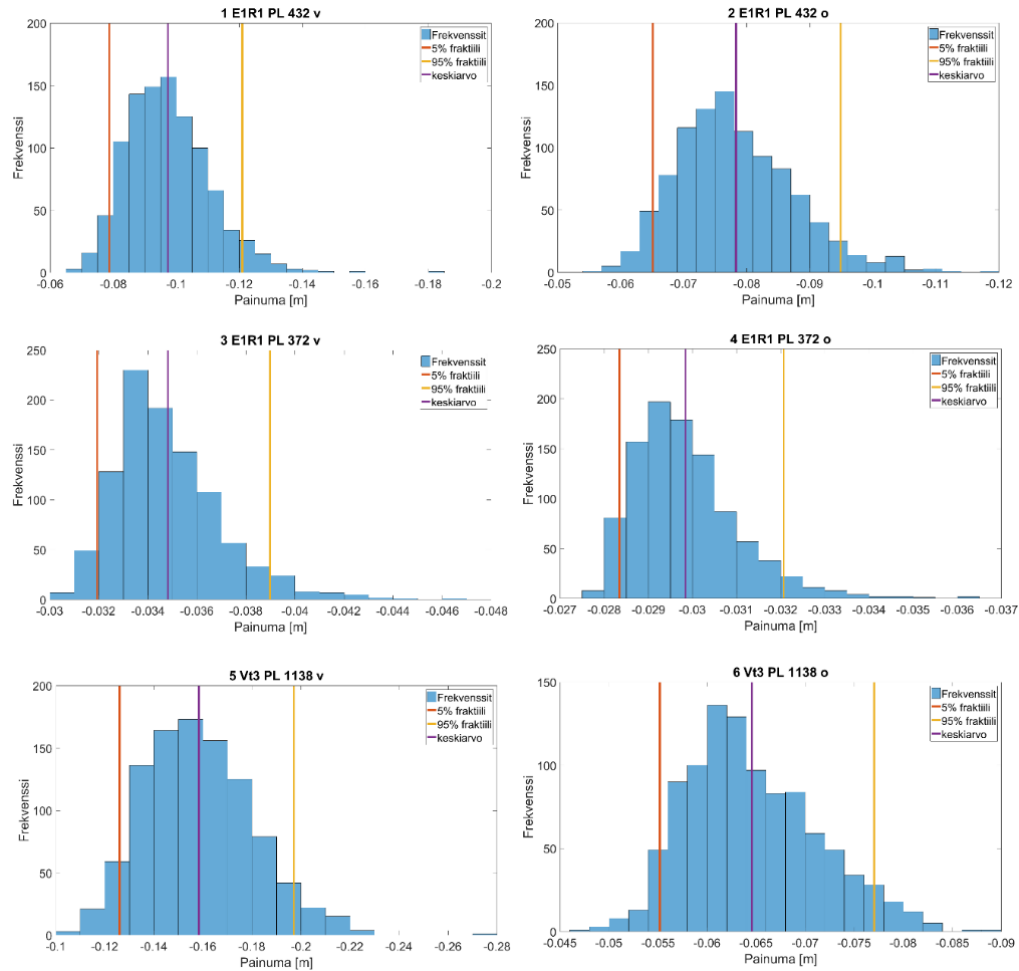
Kokoonpuristuvuusindeksien jakaumat määritettiin antamalla kokoonpuristuvuusindeksin variaatiokerroin sekä kunkin kerroksen havaintojen keskiarvo. Muodostettujen satunnaisarvojen keskiarvot olivat täten likimain samat kuin deterministisessä laskennassa. Variaatiokertoimen arvona käytettiin $COV = 40\%$. Kullakin simulaatiokerralla muodostetut parametrit tallennettiin parametrivektoreihin, joista lopuksi tulostettiin histogrammit MATLABin valmiilla histogrammin tulostuskomennnoilla. Kokoonpuristuvuusindeksien histogrammit painumatangon 1 kohdalta tehdyssä laskelmassa, jossa varioitiin vain kokoonpuristuvuusindeksiä, on esitetty *Kuvassa 91*. Kunkin painumatangon kohdalta tehdyissä laskelmissa histogrammit poikkesivat toisistaan hieman, koska laskelmat tehtiin yksitellen tangoittain. Histogrammien muodot ovat kuitenkin likimain samat kaikissa laskelmissa, sillä simulointikertojen lukumäärä on kussakin laskelmassa sama, $n = 1000$. *Kuvasta 91* havaitaan, että laskennassa käytettyjen kokoonpuristuvuusindeksien histogrammit noudattavat tarkoituksen mukaisesti log-normaalijakauman muotoa keskiarvon ollessa likimain sama kuin deterministisessä laskelmassa kussakin kerroksessa.



Kuva 91. Monte Carlo -simuloinnin kokoonpuristuvuusindeksien histogrammit. *kk* = kuivakuori, numerointi *Cc:n* perässä tarkoittaa kutakin savikerrosta kuivakuoren pinnasta alaspäin lukien.

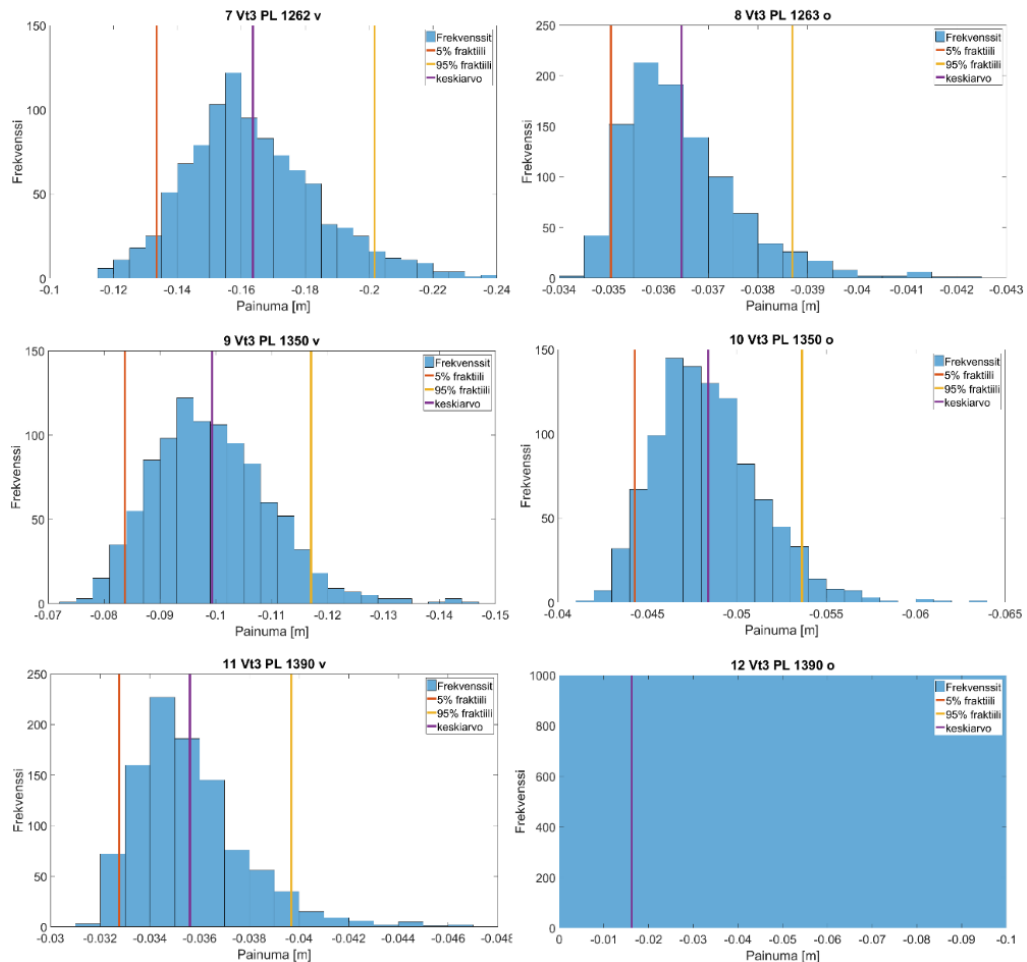
Histogrammit painumatankojen kohdalta lasketuista painumista, kun varioitiin vain kokoonpuristuvuusindeksiä, on esitetty *Kuvissa 92 ja 93*. Kuvissa on esitetty myös laskettujen painumien keskiarvot sekä 5 %:n ja 95 %:n fraktiilit, jotka muodostavat välin, jonka sisälle 90 % lasketuista painumista sijoittuvat. Kuvista havaitaan, että myös lasketut painumat noudattavat likimain log-normaalijakauman muotoa.

Kuvista 92 ja 93 havaitaan myös, että laskettujen painumien arvot vaihtelevat vähiten kohdissa, joissa lasketun painuman keskiarvo on pieni, eli kohdissa joissa suuri osa muodonmuutoksista tapahtuu elastisella alueella. Tässä laskelmassa ei varioitu elastisen osan kokoonpuristuvuusindeksiä C_r , joten se on kussakin kerroksessa vakio simulaatiokerrasta riippumatta. Tämä huomataan etenkin painumatangon 12 kuvaajasta, jossa kaikilla simulaatiokerroilla on saatu sama painuman arvo. Tämä tarkoittaa sitä, että kyseisessä x,y-kohdassa esikonsolidaatiojännitys ei laskennassa ylitä ja painumat on laskettu jokaisella simulaatiokerralla pelkästään C_r arvoilla.



Kuva 92.

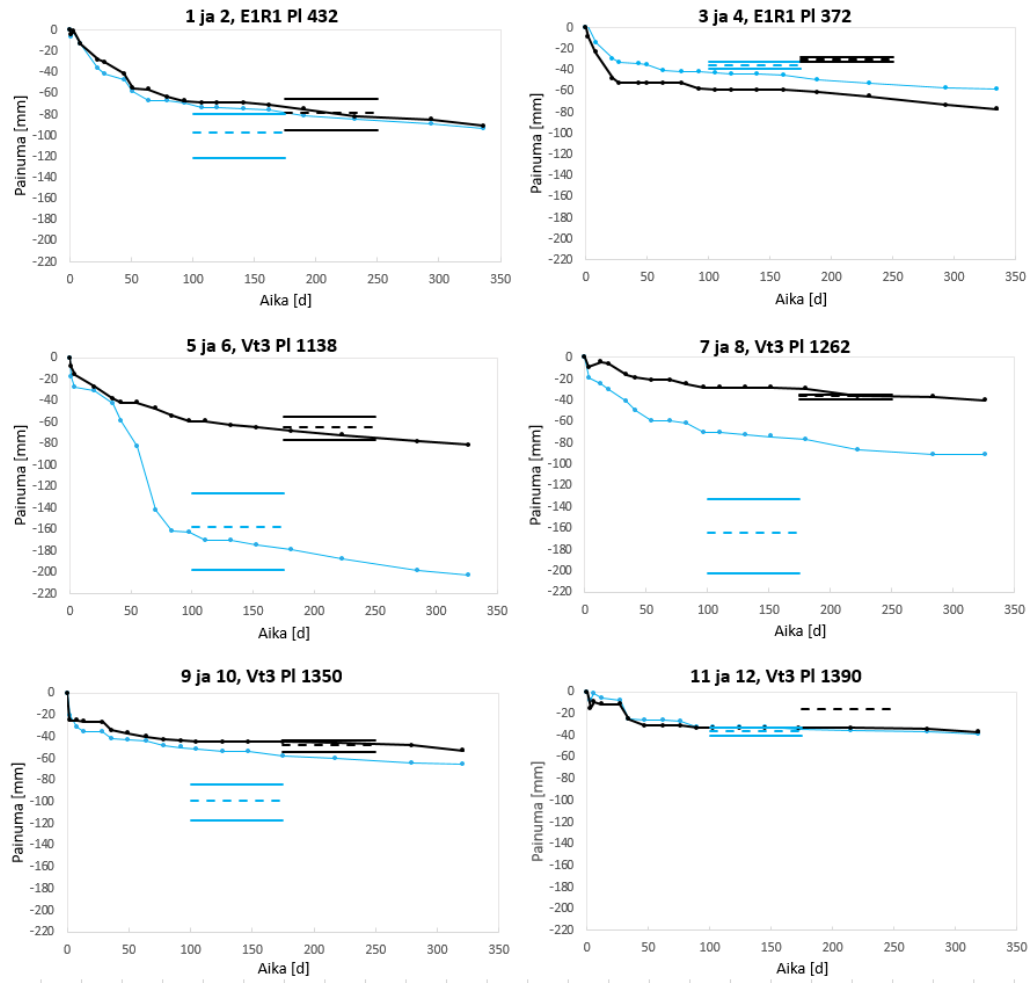
Laskettujen painumien histogrammit, painumatangot 1...6. Laskennassa varioitu normaalikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksejä C_c . Pystyyiivat vasemmalta lukien: 5 % fraktiili, keskiarvo, 95 % fraktiili.



Kuva 93. Laskettujen painumien histogrammit, painumatangot 7...12. Laskennassa varioitu normaalikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksejä C_c . Pystyviivat vasemmalta lukien: 5 % fraktiili, keskiarvo, 95 % fraktiili.

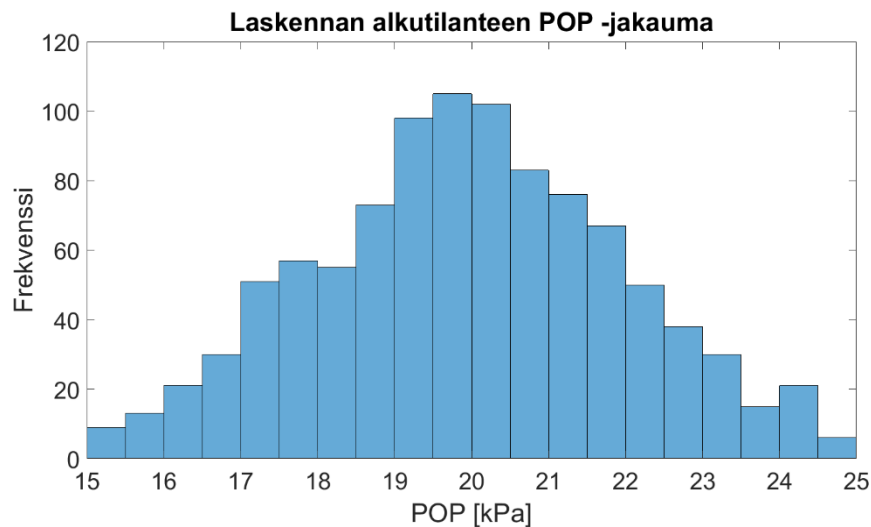
Kunkin painumatangon kohdalla laskettujen primaarikonsolidaation loppuarvojen keskiarvo, laskennan 90 %:n väli sekä toteutuneet painumat on esitetty Kuvassa 94. Kuvasta havaitaan, että mitä suurempi on laskettujen painumien keskiarvo, sitä suurempi on laskettujen painumien 90 %:n väli. Tämä johtuu siitä, että suurempien painumien kohdalla syvyysuunnassa useampi laskentapiste on normaalikonsolidoituneella alueella ja näin ollen C_c -arvojen variaation vaikutuksen piirissä. Lisäksi suurempien painumien kohdalla normaalikonsolidoituneen alueen muodonmuutoksia tapahtuu kerroksissa, joissa C_c :n keskiarvo ja siten varianssi ovat suuria.

Kaiken kaikkiaan toteutuneiden painumien viimeisimmät mittaustulokset osuvat laskettujen primaarikonsolidaation loppuarvojen 90 %:n väleille hyvin. Kokoonpuristuvuusindeksin variaatio ei kuitenkaan vaikuta laskennassa käytettyyn konsolidaatiotilaan, joten lasketut painumat sijoittuvat osassa laskentakohtia aavistuksen verran liian pienten painumien kohdalle deterministisen laskennan tapaan. Painumatankojen 7 ja 9 kohdalla lasketut painumat ovat deterministisen laskennan tapaan liian suuria.



Kuva 94. Toteutuneet painumat, painumatankojen kohdalta lasketut primaarikonsolidaation loppuarvojen keskiarvot ja välit, joilla 90 % lasketuista painumista ovat. Laskennassa varioitu normaalikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksejä C_c .

Seuraavassa laskelmassa varioitiin alkutilanteen ylikonsolidaatiota. Ylikonsolidaation keskiarvoksi laskelmaan määritettiin sama kuin aiemmissa laskelmissa eli 20 kPa. Tähän lisättiin jokaisella simulaatiokerralla virhetermi, jonka oletettiin noudattavan kolmiojakaumaa huippuarvonaan 0 kPa, miniminä -5 kPa ja maksimina 5 kPa. Näin ollen laskennassa ylikonsolidaation POP vaihteluväli oli 15...25 kPa. Laskennan ylikonsolidaation arvojen histogrammi painumatangon 1 kohdalta tehdyssä laskelmassa on esitetty Kuvassa 95. Edellisen laskennan tapaan laskelmat tehtiin yksitellen painumatangoittain, joten ylikonsolidaation jakauma vaihteli hieman laskennasta toiseen. Jakauman muoto oli kaikissa laskelmissa kuitenkin likimain sama, koska simulointien määrä oli kaikissa laskelmissa sama, $n = 1000$. Laskennassa käytettyjen jakaumien parametrit on esitetty Taulukossa 16.



Kuva 95. Laskennan ylikonsolidaation histogrammi.

Taulukko 16. Jakaumien parametrit, kun varioitiin ainoastaan ylikonsolidaatiota.

	Cc	POP	Kuivakuoren alapinta
Jakauma	vakio	20 kPa + virhetermi	vakio, mallin mukainen
Virhetermin jakauma	-	kolmiojakauma(-5, 0, 5)	-

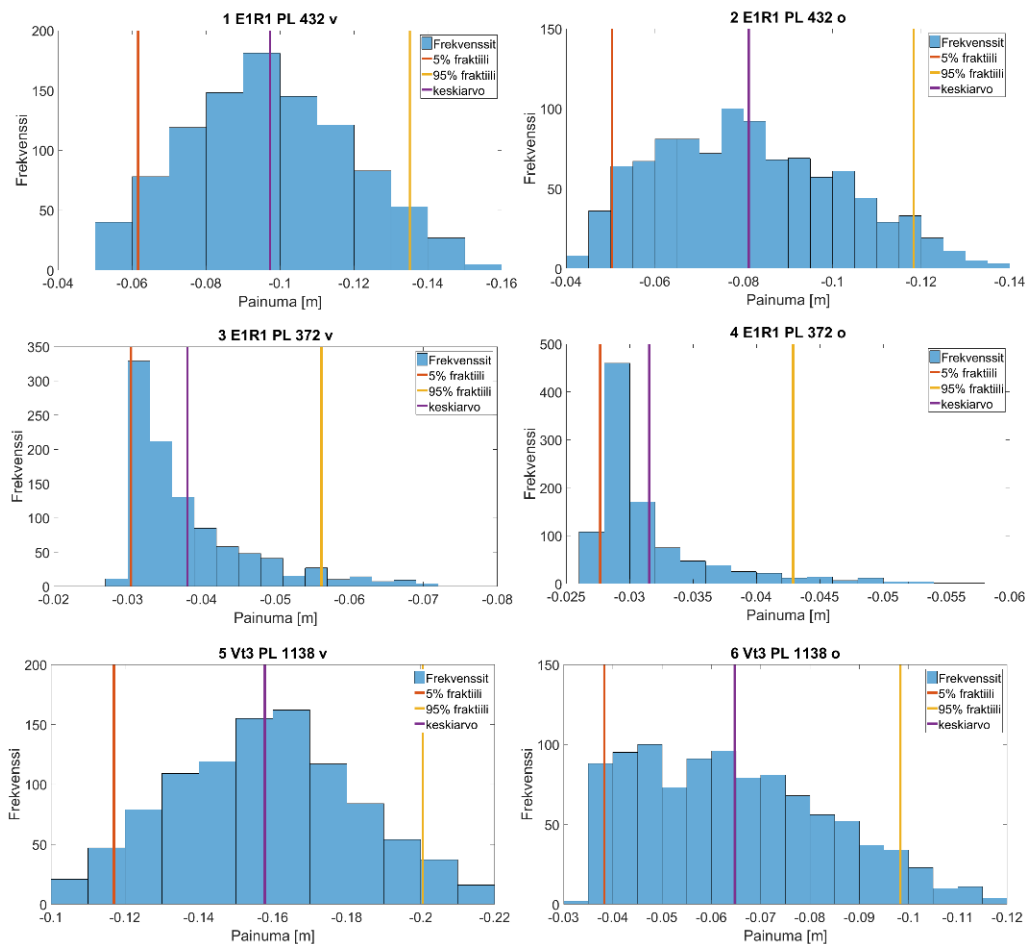
Kerros	Cc	COV
Kuivakuori	0,1	0 %
Savi 1	0,88	0 %
Savi 2	0,98	0 %
Savi 3	1,31	0 %
Savi 4	1,41	0 %
Savi 5	0,78	0 %

Ylikonsolidaation varioinnilla lasketut primaarikonsolidaation loppuarvot painumastankojen kohdalta on esitetty Kuvissa 96 ja 97. Kuvista havaitaan, että lasketut painumat noudattavat kolmiojakaumaa sitä paremmin, mitä suurempi on lasketun painuman keskiarvo.

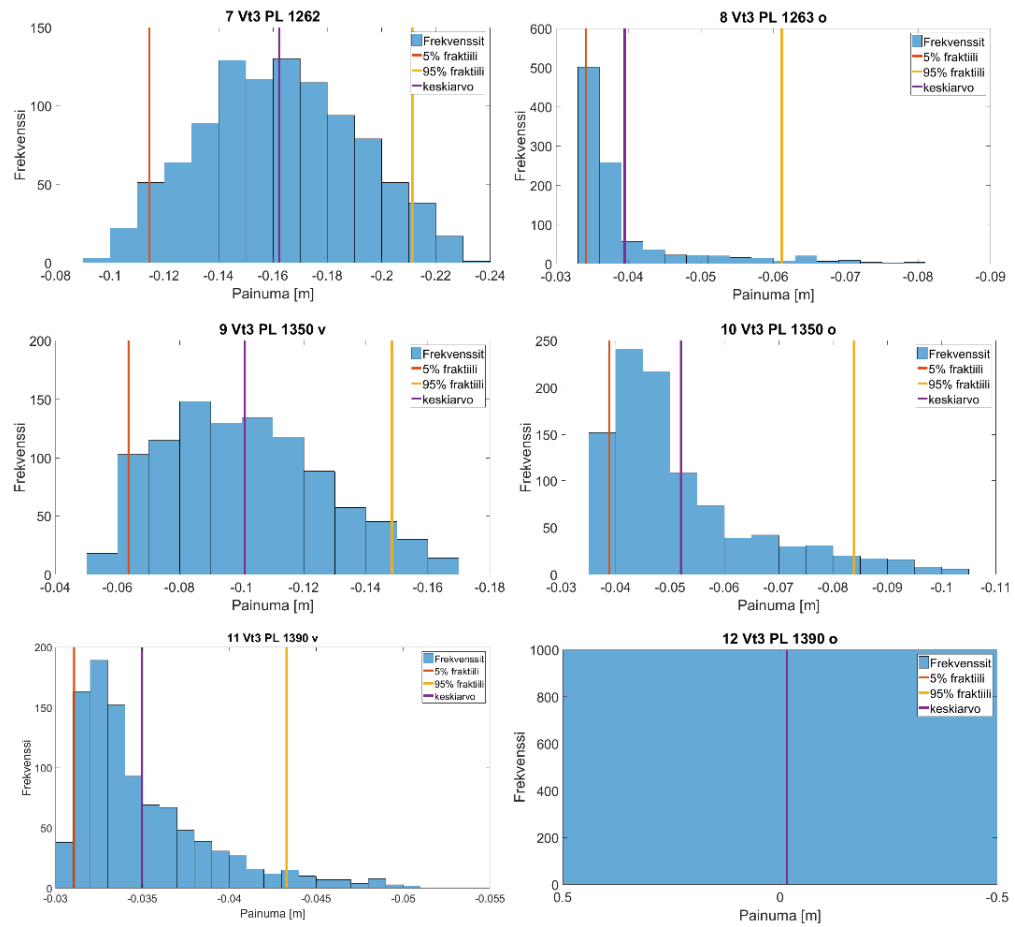
Kohdissa, joissa painumat ovat pieniä, suurin osa muodonmuutoksista tapahtuu ylikonsolidoituneella alueella. Koska näissä kohdissa liikutaan suurelta osin ylikonsolidoituneella alueella jo keskimääräisellä ylikonsolidaation arvolla, keskiarvoa suuremmat ylikonsolidaation arvot vaikuttavat laskettuihin painumiin vain vähän. Keskiarvoa pienemmät ylikonsolidaation arvot sen sijaan vaikuttavat enemmän, sillä tällöin osa laskentapisteistä siirtyy ylikonsolidoituneelta alueelta normaalkonsolidoituneelle alueelle ja lasketut painumat kasvavat. Tämän vuoksi pienillä painumilla jakaumat ovat oikealle vinoja. Suuremmilla painumilla tämän merkitys on vähäisempi ja näin ollen jakaumat noudattavat paremmin kolmiojakaumaa, jota käytettiin myös parametrien varioinnin jakaumana.

Painumatangon 12 kohdalla painumien histogrammista havaitaan, että painuman arvoksi on saatu jälleen kaikilla simulointikerroilla sama arvo. Täten edes ylikonsolidaation jakauman pienimmäkään arvot eivät aiheuta esikonsolidaatiojännityksen ylittymistä kyseisessä kohdassa.

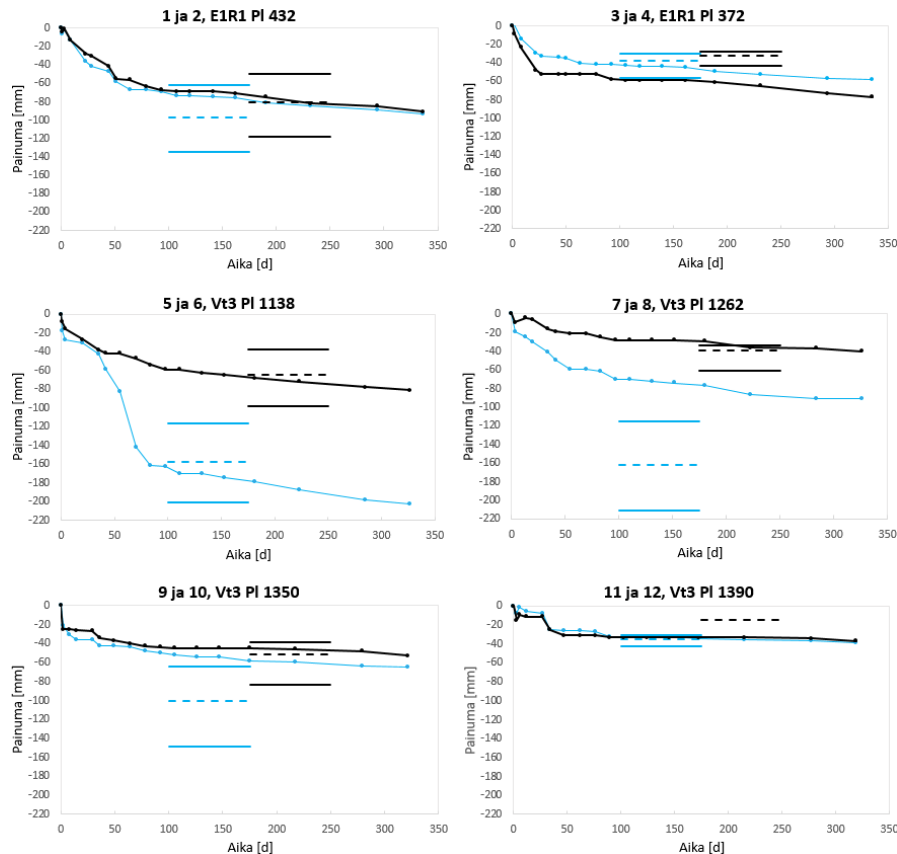
Lasketut primaarikonsolidaation loppuarvon keskiarvot, 90 %:n välit sekä toteutuneet painumat on esitetty *Kuvassa 98*. Kuvasta havaitaan, että ylikonsolidaation varioinnilla lasketut painumien välit ovat suurempia kuin kokoonpuristuvuusindeksin varioinnilla. Tämä johtuu osittain ylikonsolidaation varioinnissa käytetystä kolmiojakaumasta, joka määritettiin yksinkertaistaen siten, että ylikonsolidaation vaihteluväli on laskelmissa 15...25 kPa. Tässä tapauksessa laskennassa käytetyn ylikonsolidaation merkitys on hyvin suuri, sillä useassa laskentapisteesä pengerkuorman alla vaikuttava jännitys on hyvin lähellä ödometrikokeilla määritettyä esikonsolidaatiojännitystä. Voidaankin päätellä, että tällaisessa tapauksessa laskennassa käytetty konsolidaatiotila vaikuttaa laskettuihin painumiin enemmän kuin laskennassa käytetty kokoonpuristuvuusindeksi.



Kuva 96. Laskettujen painumien histogrammit, painumatangot 1...6. Laskennassa varioitu ylikonsolidaatiota POP. Pystyviivat vasemmalta lukien: 5 % fraktiili, keskiarvo, 95 % fraktiili.



Kuva 97. Laskettujen painumien histogrammit, painumatangot 7...12. Laskennassa varioitu ylikonsolidaatiota POP. Pystyviivat vasemmalta lukien: 5 % fraktiili, keskiarvo, 95 % fraktiili.

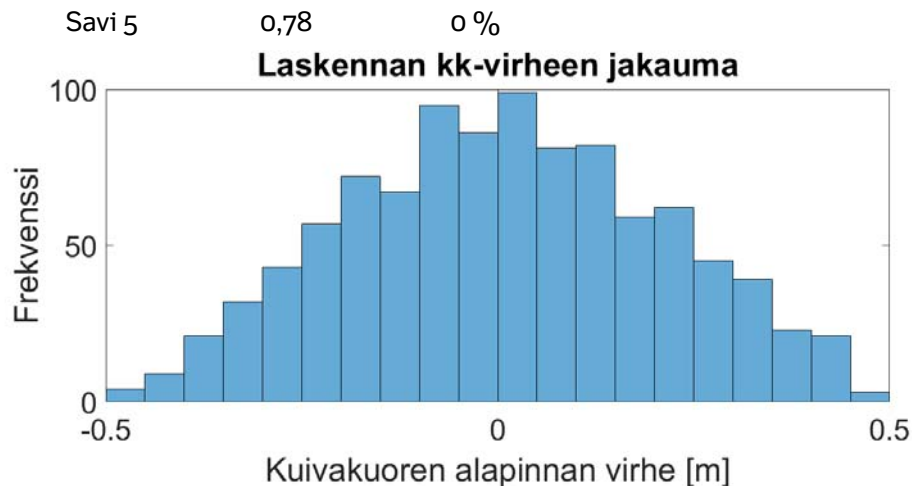


Kuva 98. Toteutuneet painumat, painumatankojen kohdalta lasketut primaari-konsolidaation loppuarvojen keskiarvot ja välit, joiden sisällä 90 % lasketuista painumista ovat. Laskennassa varioitu ylikonsolidaatiota POP.

Seuraavassa laskelmassa varioitiin kuivakuoren alapinnan eli pohjaveden alapinnan tasoa. Tämä tehtiin siten, että jokaisella simulaatiokerralla kuivakuoren alapinnan z-koordinaatteihin lisättiin virhetermi, jonka oletettiin noudattavan kolmiojakaumaa huippuarvonaan 0 m, miniminä -0,5 m ja maksiminaan 0,5 m. Näin ollen laskennassa kuivakuoren alapinnan taso vaihteli simulaatiokerrasta toiseen välillä mallinnettu pinta $\pm 0,5$ m. Laskennassa käytettyjen jakaumien parametrit on esitetty Taulukossa 17. Painumatangon 1 kohdalta tehdyn laskennan kuivakuoren alapinnan virhetermin histogrammi on esitetty Kuvassa 99. Histogrammi vaihteli jälleen hieman laskennasta toiseen, koska laskelmat tehtiin yksitellen tangoittain.

Taulukko 17. Jakaumien parametrit, kun varioitiin kuivakuoren alapinnan tasoa.

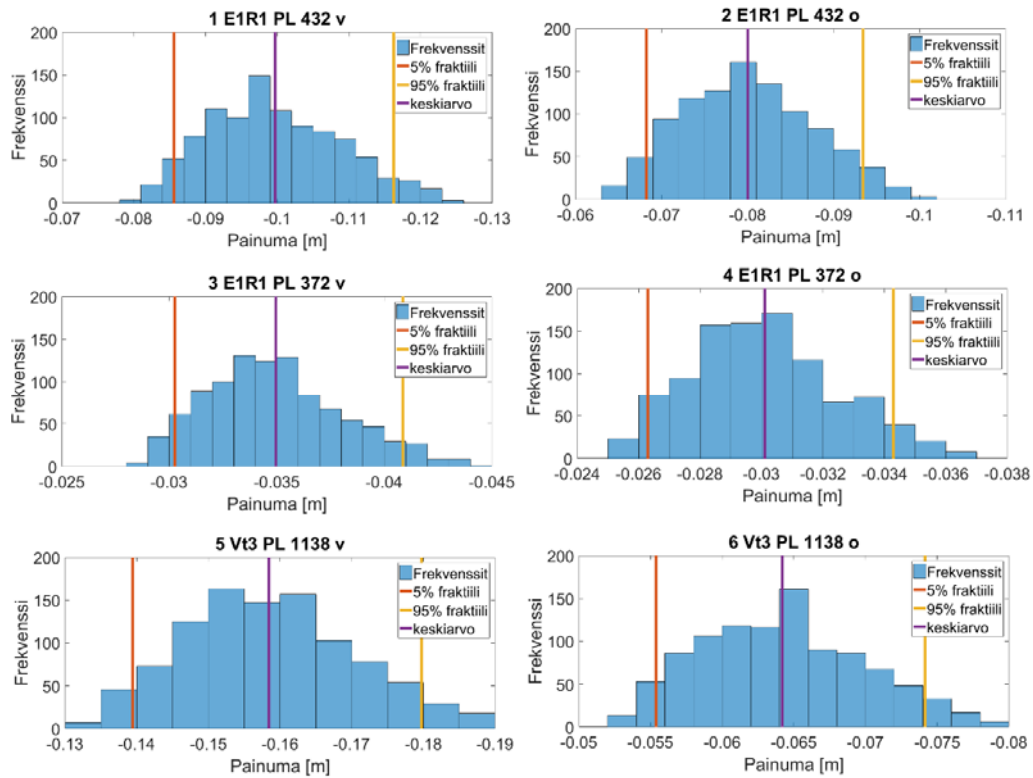
	Cc	POP	Kuivakuoren alapinta
Jakauma	vakio	vakio, 20 kPa	mallin mukainen + virhetermi
Virhetermin jakauma	-	-	kolmiojakauma(-0.5, 0, 0.5)
Kerros	Cc	COV	
Kuivakuori	0,1	0 %	
Savi 1	0,88	0 %	
Savi 2	0,98	0 %	
Savi 3	1,31	0 %	
Savi 4	1,41	0 %	



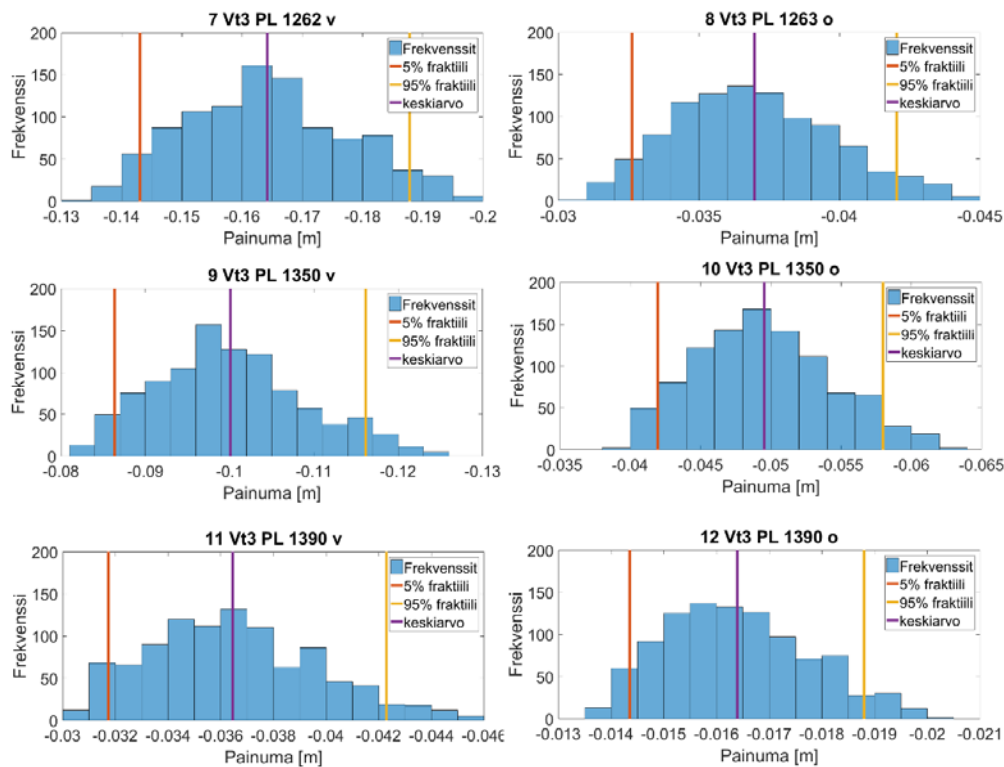
Kuva 99. Kuivakuoren alapinnan virhetermin histogrammi.

Kuivakuoren alapinnan tason varioinnilla lasketut painumat painumatankojen kohdalta on esitetty *Kuvissa 100* ja *101*. Kuvista havaitaan, että kuivakuoren alapinnan varioinnilla laskettujen painumien jakaumat ovat hivenen oikealle vinoja, vaikka varioinnissa käytettiin symmetristä kolmiojakaumaa. Tämä johtuu ylikonsolidaation variointilaskelman tapaan siitä, että keskimäärin suuressa osassa laskentapistettä ollaan ylikonsolidoituneella alueella. Kun kuivakuoren alapinnan virhetermi on negatiivinen eli kun kuivakuoren alapinta on alkuperäistä mallinnettua pintaa alempana, vallitseva jännitys sekä ensikonsolidaatiojännitys kasvavat. Tämä vaikuttaa vain vähän muodonmuutoksiin niissä pisteissä, jotka ovat ylikonsolidoituneella alueella jo keskimääräisellä kuivakuoren alapinnan tasolla. Sen sijaan, kun virhetermi on positiivinen eli kuivakuoren alapinta on alkuperäistä mallinnettua pintaa ylempänä, siirtyy osa savikerroksen yläosien laskentapistettä ylikonsolidoituneelta alueelta normaalikonsolidoituneelle alueelle, ja painumat kasvavat huomattavasti. Vaikutus ei kuitenkaan ole yhtä suuri kuin suoraan ylikonsolidaation varioimisella käyttäen edellä esitettyjä jakaumia.

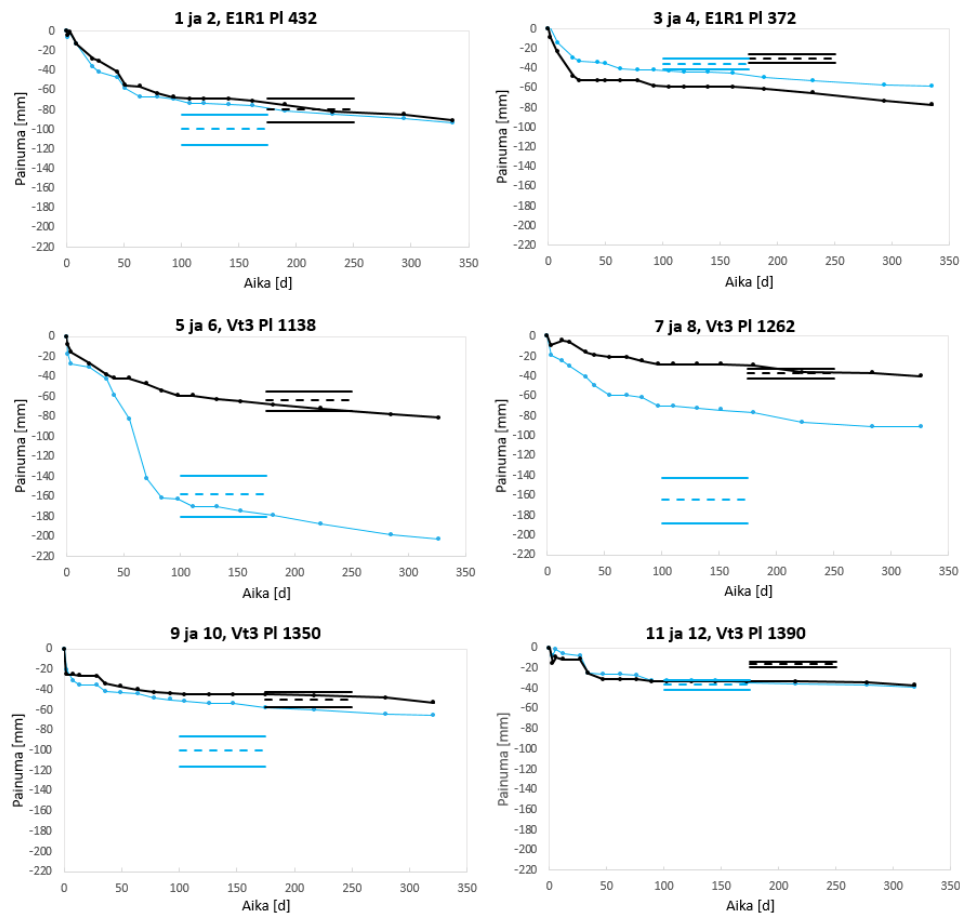
Kuivakuoren alapinnan varioinnilla lasketut primaarikonsolidaation loppuarvon keskiarvot, 90 %:n välit sekä toteutuneet painumat on esitetty *Kuvassa 102*. Kuvasta havaitaan, että kuivakuoren alapinnan varioinnilla on tässä tapauksessa pienempi merkitys kuin varioinnin kohdistamisella suoraan ylikonsolidaatioon. Ylikonsolidaation variointilaskelmassa käytettiin kuitenkin kohtalaisen laajaa jakaumaa, mikä osaltaan selittää ylikonsolidaation varioinnin merkitystä.



Kuva 100. Laskettujen painumien histogrammit, painumatangot 1...6. Laskennassa varioitu kuivakuoren alapinnan tasoa.



Kuva 101. Laskettujen painumien histogrammit, painumatangot 7...12. Laskennassa varioitu kuivakuoren alapinnan tasoa.



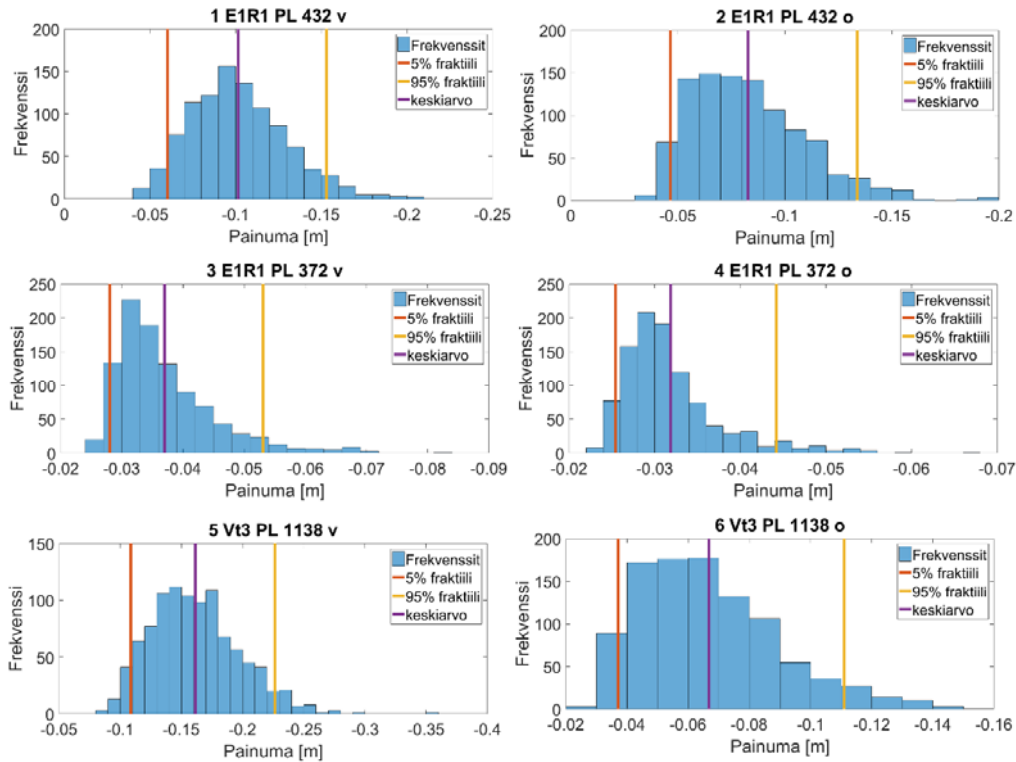
Kuva 102. Toteutuneet painumat, painumatankojen kohdalta lasketut primaarikonsolidaation loppuarvojen keskiarvot ja välit, joiden sisällä 90 % lasketuista painumista ovat. Laskennassa varioitu kuivakuoren alapinnan tasoa.

Laskenta suoritettiin vielä kertaalleen siten, että varioitiin samassa laskelmassa kokoonpuristuvuusindeksejä, ylikonsolidaatiota sekä kuivakuoren alapinnan tasoa samanaikaisesti edellä esitetyillä jakaumilla. Laskennassa käytetyt jakaumat on esitetty Taulukossa 18. Tällä tavoin laskettujen painumien histogrammit on esitetty Kuvissa 103 ja 104. Kuvista havaitaan, että laskettujen painumien histogrammien muoto noudattaa nyt likimääräisesti yhdistettyä kolmio- ja log-normaalijakaumaa.

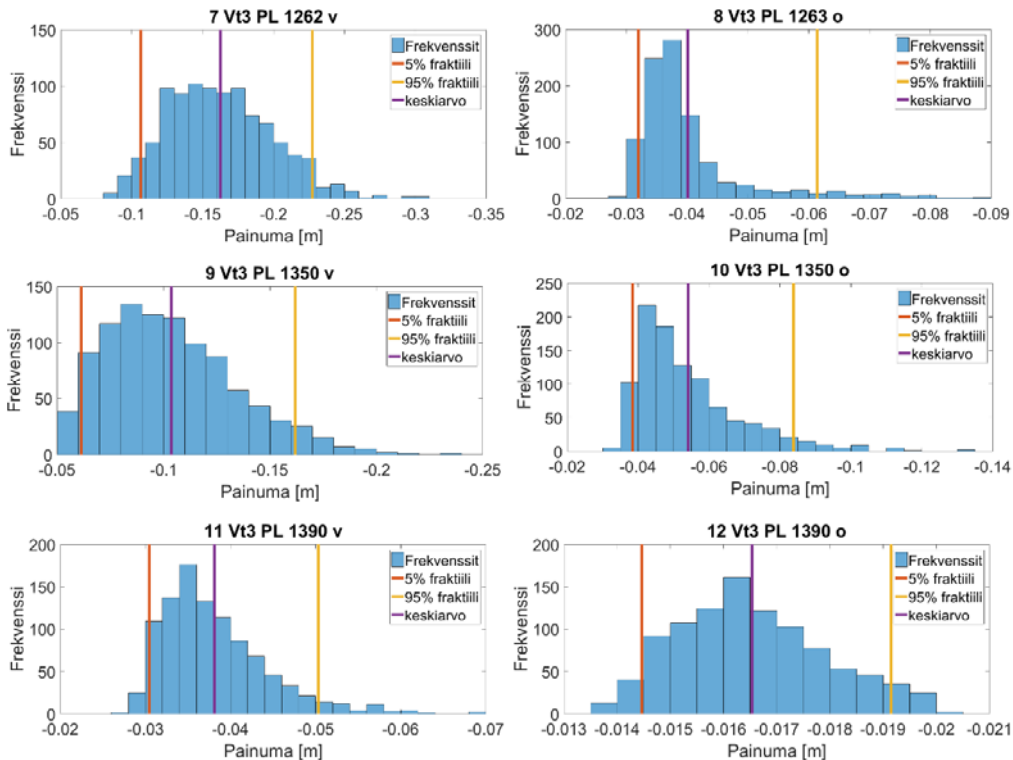
Taulukko18. Jakaumien parametrit, kun varioitiin kokoonpuristuvuusindeksejä, ylikonsolidaatiota ja kuivakuoren alapinnan tasoa.

Cc		POP	Kuivakuoren alapinta
Jakauma	log-norm	20 kPa + virhetermi	mallin mukainen + virhetermi
Virhetermin jakauma		-	-
		kolmiojakauma(-5, 0, 5)	kolmiojakauma(-0.5, 0, 0.5)

Kerros	Cc	COV
Kuivakuori	0,1	40 %
Savi 1	0,88	40 %
Savi 2	0,98	40 %
Savi 3	1,31	40 %
Savi 4	1,41	40 %
Savi 5	0,78	40 %

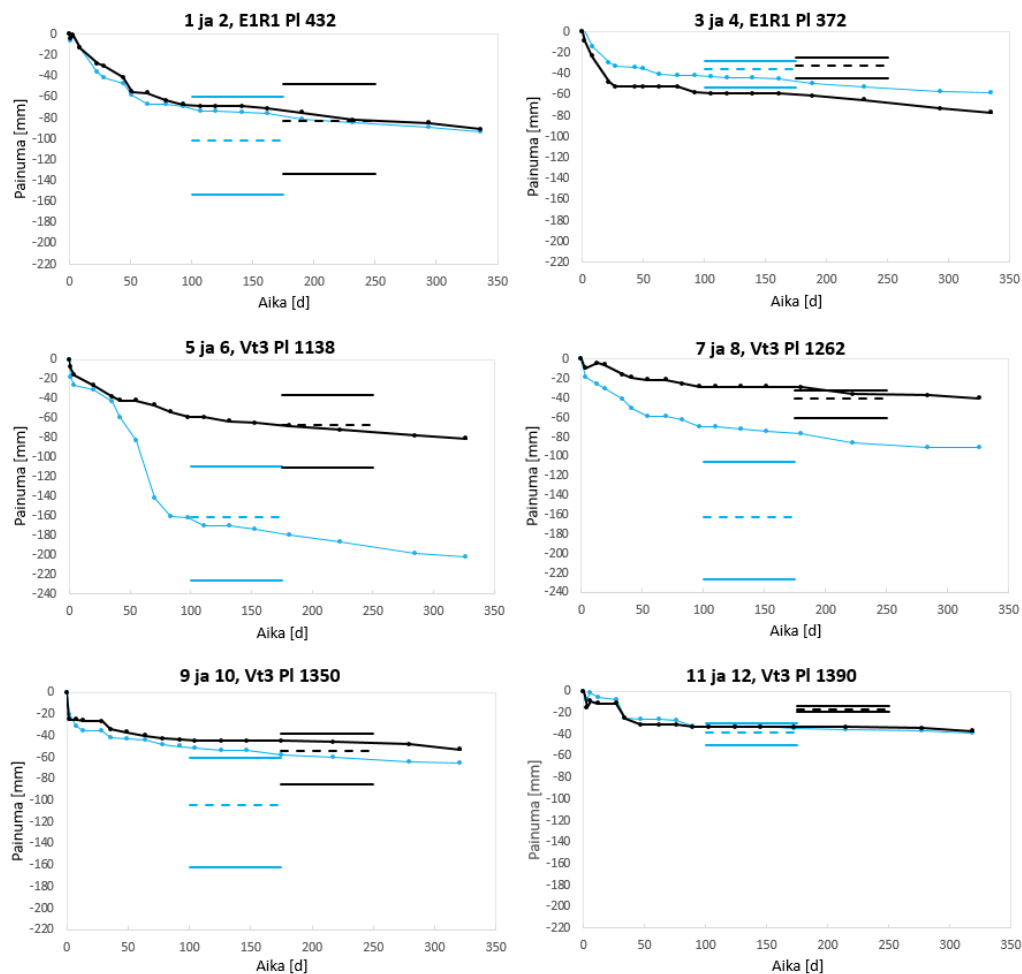


Kuva 103. Laskettujen painumien histogrammit, painumatangot 1...6. Laskennassa varioitu kokoonpuristuvuusindeksejä, ylikonsolidaatiota ja kuivakuoren alapinnan tasoa.



Kuva 104. Laskettujen painumien histogrammit, painumatangot 7...12. Laskennassa varioitu kokoonpuristuvuusindeksejä, ylikonsolidaatiota ja kuivakuoren alapinnan tasoa.

Toteutuneet painumat sekä laskettujen painumien keskiarvot ja 90 %:n välit on esitetty *Kuvassa 105*. Kuvasta havaitaan, että lähes kaikki viimeisimmät painumamittaustulokset ovat lasketun primaarikonsolidaation loppuarvon 90 %:n välin sisällä. Ainoastaan painumatankojen 4, 7 ja 12 kohdalla näin ei ole. Tangon 4 kohdalla liikutaan kuitenkin suurelta osin ylikonsolidoituneella alueella ja painumat ovat pieniä, jolloin laskenta on epätarkkaa. Sama pätee myös tangon 12 kohtaan. Tangon 7 kohdalla lasketun painuman virheellisyyden mahdolliset syyt on esitetty deterministisen laskennan yhteydessä kappaleessa 5.4.1.



Kuva 105. Toteutuneet painumat, painumatankojen kohdalta lasketut primaarikonsolidaation loppuarvojen keskiarvot ja välit, joiden sisällä 90 % lasketuista painumista ovat. Laskennassa varioitu kokoonpuristuvuusindeksejä, ylikonsolidaatiota ja kuivakuoren alapinnan tasoa.

Edellä esitettyjen laskelmien perusteella voidaan arvioida, että keskimääräisillä maaparametreilla tehdyn yksittäisen painumalaskelman tarkkuus on luokkaa ± 50 %. Arvio perustuu edellä esitettyihin parametrien jakaumaoletuksiin, ja se sisältää vain kokoonpuristuvuusindeksiin, ylikonsolidaatioon ja kuivakuoren paksuuteen liittyvän epävarmuuden. Muiden parametrien epävarmuus ja vaihtelu lisäävät epätarkkuutta.

Koelaskennassa kokoonpuristuvuusindeksin keskiarvot perustuivat kohteen havaintoihin, mutta variaatiokerrointa ei suoraan määritetty havainnoista, vaan variaatiokertoimenä käytettiin kirjallisuudesta valittua arvoa. Lisäksi ylikonsolidaation ja kuivakuoren alapinnan tason varioinnissa käytettiin kohtalaisen karkeaa arviota, jonka mukaan ne vaihtelivat laskennassa noudattaen kolmiojakaumaa. Kuitenkin,

vaikka laskenta sisältäisikin tiettyjä – mahdollisesti virheellisiäkin – jakaumaoletuksia, tilastollisella laskennalla pystytään arvioimaan keskiarvoisilla parametreilla lasketun painuman luotettavuutta, kun tarkastellaan parametrien varioinnilla muodostuvaa histogrammia sekä sen fraktiileja. Lisäksi pystytään havainnoimaan paremmin, mitkä parametrit vaikuttavat laskennan tarkkuuteen eniten, ja mikä on laskettujen painumien vaihteluväli kyseisillä parametrien jakaumilla.

Tilastollinen primaarikonsolidaation loppuarvojen laskenta tukee päätelmää, jonka mukaan viimeisimmät painumamittaustulokset edustavat primaarisen konsolidaation loppuarvoja, tai ovat hyvin lähellä niitä. Näin olleen voitaneen olettaa, että käynnissä oleva painuma on hyvin suurelta osin luonteeltaan sekundaaripainumaa, jota ei tämän työn laskelmissa huomioitu.

Koelaskelmissa tarkasteltiin painumia yksittäisistä pisteistä painumatankojen kohdalta. Laskentamoottorilla on lisäksi mahdollista tehdä saman tyyppistä tilastollista laskentaa myös esimerkiksi kahden pisteen välisestä painumaerosta, sillä tilastollisen laskennan lopputuloksena saadaan laskentamoottorilla matriisi, joka sisältää laskentapistehilan määrittämissä kohdissa lasketut painumat kullakin simulaatiokerralla. Tästä voidaan edelleen laskea kullakin simuloinnilla syntynyt painumaero kahden x, y-pisteen välillä, ja muodostaa samaan tapaan keskiarvo sekä esimerkiksi väli, jolla 90 % lasketuista painumaeroista on, tai esimerkiksi arvo, joka ylittyy 5 %-ssa simulointeja. On kuitenkin huomioitava, että tässä työssä kehitetyllä laskentamoottorilla voidaan laskea vain primaarista konsolidaatiopainumaa, muttei sekundaaripainumaa. Laskentamoottorissa ei myöskään lasketa aika-painumaa, joten painumaero voidaan laskea vain primaarikonsolidaation lopussa.

6 Johtopäätökset

Työssä kehitettiin MATLAB-ohjelmistoa käyttävä painumalaskentamoottori, joka hyödyntää kolmiulotteisen laskentamallin muodostamisessa tietomallin Inframodel – pintojen koordinaattitietoja. Laskentamoottorilla lasketaan primaarisen konsolidaatiopainuman loppuarvoja. Painumien laskenta perustuu laskentamoottorissa kokoonpuristuvuusindeksimenetelmään. Moottorissa käytetään kuormituksena kolmiulotteista pengerkuormaa, mutta painumien laskennassa tarkastellaan ainoastaan pystysuuntaisia jännityksiä.

Moottoriin implementoitiin mahdollisuus painumien laskentaan joko deterministisesti tai tilastollisilla menetelmillä käyttämällä Monte Carlo -simulointia. Laskentamoottorilla tehtävään Monte Carlo -simulointiin rakennettiin mahdollisuus varioida laskennassa käytettyjä normaalikonsolidoituneen osan kokoonpuristuvuusindeksejä, ylikonsolidaatiota ja kuivakuoren alapinnan tasoa. Laskenta voidaan tehdä varioimalla kutakin yksittäin tai useampaa samanaikaisesti.

Testi- ja validointilaskelmien perusteella osoittautui, että laskentamoottorin deterministinen avoimen tilan painumien laskenta tuottaa yhteneviä tuloksia nykyisin laajassa käytössä olevan GeoCalc-painumalaskentaohjelman kanssa, kun kolmiulotteinen kuormitus voidaan redusoida 2D-poikkileikkaukseksi. Elementtimenetelmään perustuva PLAXIS 2D –ohjelmalla vastaavilla parametreillä lasketut painumat olivat hieman pienempiä. Kolmiulotteisen kuormitustilanteen vaikutuksen todettiin olevan merkityksellinen vain aivan kuormitusalueen reunalla.

Keinotekoisilla pinnoilla tehtyjen validointilaskelmien lisäksi laskentamoottorilla suoritettiin työssä koelaskentaa todellisilla tietomallin pinnoilla. Koelaskennan kohteena oli Vt3/Vt18 Laihia -väylähankkeessa alkuvuodesta 2016 rakennettu haarautuva esikuormituspenger, jonka painumia on mitattu penkereen rakentamisen yhteydessä asennetuista painumatangoista. Hankkeen tietomalliin sisältyvistä penkereen toteutusmallipinnasta sekä alueen maaperän rajapintojen malleista muodostettiin moottorilla laskentamalli, jolla tehtiin koelaskentaa sekä deterministisellä että tilastollisella menetelmällä.

Koelaskennan perusteella osoittautui, että laskentamoottori on käyttökelpoinen työkalu painumien arviointiin, kun penkereiden suunnittelu tehdään tietomallipohjaisesti. Laskentamoottorilla pystytään yhdellä laskelmalla tunnistamaan tietomallista kohtalaisella tarkkuudella kohtia, joissa on mahdollisesti odotettavissa liian suuria painumia tai painumaeroja, mikäli penger perustetaan maanvaraisesti. Painumaseurantaa voidaan myös kohdistaa paremmin kriittisimpiin kohtiin. Esimerkiksi tämän työn koelaskentapenkereen painumaseurantatangot eivät olleet suurimpien laskettujen painumien kohdalla.

Moottorilla voidaan lisäksi vertailla esimerkiksi tien eri tasausvaihtoehtojen vaikutusta painumiin ja painumaeroihin kohtalaisen laajalla alueella edellyttäen, että tietomalli sisältää kunkin tasausvaihtoehdon mukaisesti mallinnetut tierakenteen ylimmät yhdistelmäpinnat sekä alimmat rakennepinnat (= kaivupinnat). Kun tarkastelu tehdään aikaisissa suunnitteluvaiheissa, voidaan lisäksi kohdistaa tarkempia pohjatutkimuksia painumien kannalta kriittisimpiin kohtiin.

Validointi- ja koelaskennassa osoittautui, että työssä kehitetty laskentamoottori toimii laskennallisesti oikein, ja sillä laskettaessa voidaan saada todenmukaisia tuloksia primaariselle konsolidaatiopainumalle. Kuitenkin, laskentamenetelmästä ja -ohjelmistosta riippumatta painumalaskennan tarkkuuden ja todenmukaisuuden kriittisin osatekijä on laskennassa käytettyjen parametrien oikea valinta. Koelaskelmien perusteella osoittautui, että erityistä huomiota tulee kiinnittää laskennassa käytettyyn esikonsolidaatiojännitykseen. Tämä korostuu tapauksessa, jossa jännitys pengerkuorman alla on hyvin lähellä maan esikonsolidaatiojännitystä. Maanpinnan sisältäessä olemassa olevia ojia, saattaa laskenta tuottaa korostuneen suuria painumia, mikäli ojien kaivua ei erikseen mallinneta, koska tällöin ojien kaivua ei huomioida laskennan konsolidaatiotilassa.

Parametrien epävarmuuden vuoksi painumalaskenta tulisi tehdä ensisijaisesti tilastollisilla menetelmillä, jotta pystytään arvioimaan tuloksen luotettavuutta. Koelaskennan perusteella laskentamoottoriin implementoitu Monte Carlo -simulointi tarjoaa käyttökelpoisen työkalun tällaiseen laskentaan. Moottorin tuottamista laskettujen painumien histogrammeista nähdään laskettujen painumien vaihteluvälit, kun parametreja on varioitu halutulla tavalla. Lasketuista painumista voidaan edelleen arvioida esimerkiksi tiettyjen raja-arvojen ylittymisen todennäköisyyttä. Lisäksi Monte Carlo -simuloinnilla havaitaan selkeästi, mitkä parametrit vaikuttavat laskentaan eniten, ja näin ollen voidaan kohdentaa tarkempaa tarkastelua niiden määrittämiseen.

Vt3/Vt18 Laihia -hankkeen esikuormituspenkereiden painumamittaustuloksista on havaittavissa, että painumat ovat pysyneet maltillisina ja lähes pysähtyneet 11 kuukauden havaintoaikana. Tämän perusteella voidaan todeta, että esikuormitusratkaisu on kohteessa onnistunut hyvin. Tien käytönaikaiset painumat tulevat todennäköisesti jäämään hyvin pieniksi ja näin ollen hankkeelle esitetyt tuotevaatimukset painumille ja kaltevuuden muutoksille tulevat todennäköisesti täyttymään. Laskelmien perusteella vaikuttaisi siltä, että esikuormitusratkaisua oltaisiin kohteessa voitu käyttää myös hieman suurempien pengerkorkeuksien kohdalla. (Uotinen 2017).

Koelaskelmissa kuormitustilanne oli sinänsä yksinkertainen: maan päälle rakennettava kohtalaisen laaja penger. Lisäksi kohteen maaperän rajapinnat ovat kohtalaisen tasaisia laajalla alueella. Tästä johtuen laskentageometrian kolmiulotteisuus ei ollut koelaskennassa kovin merkittävä tekijä laskettujen painumien kannalta. Näin ollen laskentageometria voidaan koelaskentakohteen tapauksessa redusoida 2D-poikkileikkaukseksi laskentatarkkuuden kärsimättä merkittävästi.

Työssä kehitetyllä laskentamoottorilla on kuitenkin mahdollista tarkastella myös esimerkiksi tapauksia, joissa maaperän rajapinnat ovat vinosti kaltevia tien tai radan mittalinjaan nähden. Tällöin tien tai radan poikkileikkauksesta tehty 2D-laskentamalli voi vääristää laskentageometriaa ja näin ollen lasketut painumat ja painumaerot voivat olla virheellisiä. Lisäksi laskentamoottorilla voidaan tarkastella esimerkiksi erilaisia ja erimuotoisia kevennysmateriaalista tehtäviä siirtymärakenteita, joiden dimensiot muuttuvat tien pituus- ja/tai poikkisuunnassa. Tällaisten rakenteiden analysointi käyttäen 2D-leikkauksia on hankalaa.

Erilaisten tien pituussuunnassa muuttuvien levennysten tarkastelu on myös moottorilla mahdollista. Moottorissa voidaan mallintaa olemassa olevien penkereiden alla tapahtunut jännitys- ja konsolidaatiotilan muutos antamalla penkereen alla oleviin laskentapisteisiin eri parametreja kuin penkereen ulkopuolella. Tämä on mahdollista, sillä kaikki laskenta moottorissa perustuu kolmiulotteisten matriisien käsittelyyn. Minkä tahansa laskentapisteen parametrien tai tarvittaessa jännitysten ja muodonmuutosten arvoja voidaan moottorissa periaatteessa muuttaa erikseen.

7 Kehitysehdotukset

Tässä työssä PINTAPAINUMA-moottorin painumalaskenta toteutettiin tarkastelemalla ainoastaan pystysuuntaisia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Koska tietomallin geometria on luonteeltaan kolmiulotteinen, on siitä mahdollista laskea maassa vallitseva jännitystila kolmiulotteisesti. Näin ollen yleisen kehityssuuntauksen tulisi olla kohti tietomallilla tehtävää kolmiulotteista FEM-laskentaa.

Mikäli painumalaskennan osalta pitäydytään klassiseen maamekaniikkaan perustuvissa laskentamenetelmissä, on tässä työssä kehitettyä painumalaskentamoottoria mahdollista laajentaa. Työssä toteutettu moottori soveltuu sellaisenaan vain tapaukselle, jossa kuormitus ei muutu ajan suhteen. Jos moottoriin implementoidaan erillisenä funktiona aika-painuman eli käytännössä huokosvedenpaineen muutosten laskenta ajan funktiona jollakin numeerisella menetelmällä – esimerkiksi GeoCalcin tapaan Galerkinin elementtimenetelmällä – on moottorilla mahdollista laskea myös tapauksia, joissa kuormitus muuttuu. Tämä kuitenkin vaatii myös pieniä lisäyksiä laskentamoottorin peruskoodiin. On kuitenkin huomioitava, että esimerkiksi GeoCalc-laskennassa käytetty yksiulotteinen veden virtaus voi vääristää aika-painumaa huomattavasti.

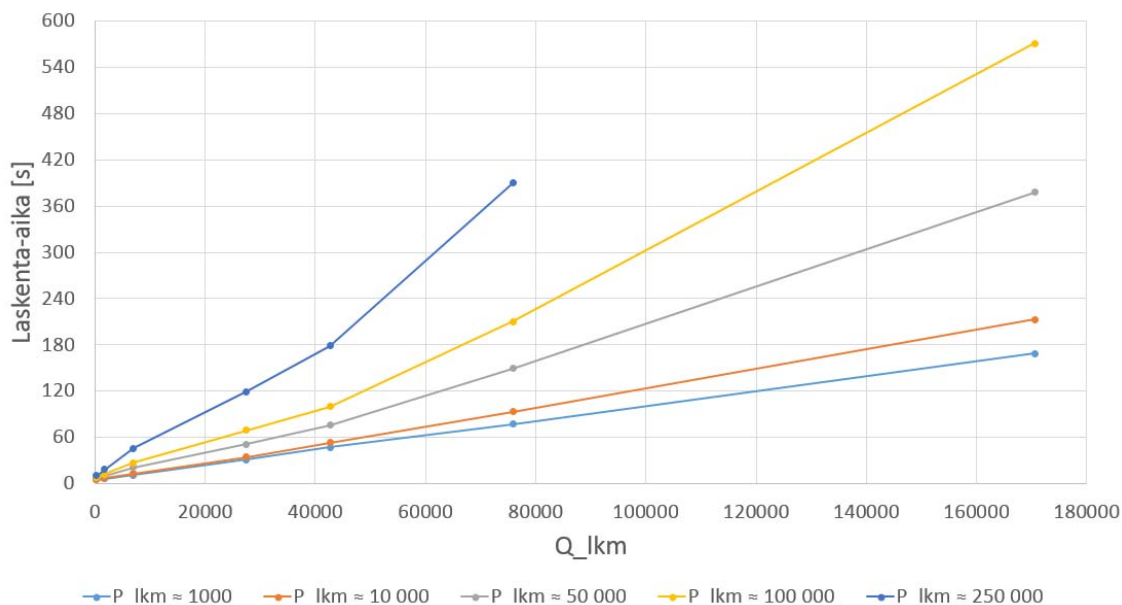
Työssä kehitettyyn laskentamoottorin versioon on periaatteessa myös mahdollista lisätä yksinkertaistettu versio ajan suhteen muuttumattoman kuorman aika-painuman laskennasta. Tämä voitaisiin toteuttaa siten, että annetaan kerrosten konsolidaatikerroin c_v ja lasketaan laskentapistehilan kunkin ”pystylinjan” kohdalla suotomatka H (yksisuuntainen tai kaksisuuntainen) pintojen pystysuuntaisten erotuksien avulla. Näiden avulla voidaan laskea konsolidaatioaste ja edelleen painuma haluttuina ajanhetkinä. Tämän tyyppinen laskenta on todennäköisesti kuitenkin kolmiulotteisen geometrian tapauksessa erittäin epätarkkaa.

Tässä työssä laskentamoottoriin sisällytettiin mahdollisuus kokoonpuristuvuusindeksien, ylikonsolidaation ja kuivakuoren alapinnan tason variointiin. Moottoriin on mahdollista lisätä myös muiden parametrien sekä kaikkien pintojen z-koordinaattien variointi. Lisäksi tässä työssä toteutetut variointifunktiot muuttavat arvoja siten, että kullakin simulaatiokerralla parametrit ovat x, y-suunnassa samat. Laskentaa voitaisiin edelleen kehittää siten, että parametreja voidaan varioida myös horisontaalisuunnassa. Tällöin on kuitenkin tärkeää määrittää parametrien pysty- ja vaakasuuntaisten korrelaatioiden pituudet, mikä vaatii lisätutkimusta.

Maaparametrit annetaan laskentamoottorissa manuaalisesti erikseen. Tulevaisuudessa, mikäli Inframodel-formaattiin saadaan liitettyä maaparametreja riittävän kattavasti, on parametrien määrittämistä mahdollista automatisoida. Lisäksi, moottoriin voisi olla mahdollista implementoida maaparametrien antaminen siten, että käytetään hyväksi Infraformatissa olevaa pohjatutkimusdataa. Laskentamoottoriin voitaisiin esimerkiksi lukea taulukkomuodossa oleva tiedosto, joka sisältää tietyistä x, y, z –pisteistä tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella määritetyt parametrit. Näiden arvojen perusteella voitaisiin laskea parametrien arvot koepisteiden välillä oleviin pisteisiin esimerkiksi interpoloimalla.

Tässä työssä laskentamoottori toteutettiin MATLAB-koodina, ja se tarvitsee toimiakseen MATLAB-ohjelmiston. Täysi hyöty laskentamoottorista saadaan, kun se tehdään jollakin yleisemmällä ohjelmointikielellä, esimerkiksi Pythonilla tai FORTRANilla. Tällöin laskentamoottorista voidaan tehdä .exe sovellus, jota voidaan käyttää myös koneissa, joissa ei ole asennettuna MATLAB-ohjelmistoa.

Laskentamoottorin laskenta-algoritmia ei myöskään tässä työssä täysin optimoitu ja tehostettu, jolloin kohtalaisen laajojen alueiden laskenta MATLAB-ohjelmistolla voi olla hidasta. Suuntaa antavia laskentapisteen sekä kuormapisteen määristä riippuvia deterministisen laskennan laskenta-aikoja tämän työn koodilla on esitetty Kuvassa 106. Yli 90 % laskenta-ajasta kuluu kuorman diskretointiin ja jännityslisäysten laskentaan. Tämän työn koodin Monte Carlo -simuloinnissa jännityslisäykset lasketaan vain kerran, joten laskenta Monte Carlo -simuloinnilla tuottaa vain pienen lisäyksen laskenta-aikoihin. Mikäli laskentamoottoriin halutaan implementoida esimerkiksi penkereen yläpinnan variointi, tulee jännityslisäykset laskea jokaisella simulointikerralla uudestaan, jolloin laskenta-ajat moninkertaistuvat. Tällöin tulisi jännityslisäysten laskentaa optimoida ja tehostaa.



Kuva 106. Deterministisen laskennan laskenta-ajat. P_lkm = laskentapisteen lukumäärä, Q_lkm = kuormapisteen lukumäärä. Aikojen mittaamisessa käytetty laitteisto ja ohjelmisto: Intel Xeon prosessori E3-1230 v2 @3,30 GHz, 4 ydintä, 8 säiettä; keskusmuisti 16 GB RAM; MATLAB R2016b (9.1.0.441655) 64-bit.

Työssä kehitetyssä moottorissa ei myöskään ole varsinaista graafista käyttöliittymää, joten kaikkien lähtötietojen muodostus tapahtuu koodiriveillä. Ideaalitilanteessa laskentamoottori toimisi suoraan mallinnusohjelman sisällä olevana lisämoduulina, johon on ohjelmoitu helppokäyttöinen käyttöliittymä.

Lähteet

A-Insinöörit. (2015). Valtateiden 3 ja 18 parantaminen Laihian kohdalla, ST-suunnitelma.

A-Insinöörit. (2016). *Hankekohtainen työselostus, Revisio 13*. Vt3 ja Vt18 parantaminen Laihian kohdalla, ST-suunnitelma.

Akbas, S.O. & Kulhawy, F.H. (2010). *Characterization and Estimation of Geotechnical Variability in Ankara Clay: A Case History*. Geotechnical and Geological Engineering. Vol. 28:5. S. 619-631. ISSN 1573-1529 (sähköinen).

Alanen, J. (2013). *Pohjaveden alenemisesta aiheutuvien painumien mallintaminen pehmeikkökohteissa*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. 86+75 s.

Biot, M.A. (1941). *General theory of three-dimensional consolidation*. Journal of Applied Physics. Vol. 12. S. 155-164.

Bjerrum, L. (1961). *The effective shear strength parameters of sensitive clays*. Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Pariisi. Ranska. Vol. 1. S. 23-28.

Brotherus, V. (2014). *Inframallintamisen hyödyntäminen geoteknisessä suunnittelussa*. Diplomityö. Oulun yliopisto. Oulu. 106+6 s.

bSF (buildingSMART Finland). (2016). *Inframodel 4 – Uudet ominaisuudet*. Esitys 8.8.2016.

Feda, J. (1978). *Stress in subsoil and methods of final settlement calculation*. Developments in Geotechnical Engineering. Vol. 18. Elsevier. ISBN 0-444-99800-4.

GTK, Geologian tutkimuskeskus. (2017). Maankamara –karttapalvelu. [Viitattu 8.2.2017]. Saatavissa: <http://gtkdata.gtk.fi/Maankamara/index.html>.

Jaksa, M.B. & Goldsworthy, J.S. & Fenton, G.A. & Kaggwa, W.S. & Griffiths, D.V. & Kuo, Y.L. & Poulos, H.G. (2005). *Towards reliable and effective site investigations*. Geotechnique. Vol. 55. S. 109-121. ISSN 0016-8505.

Janbu, N. (1967). *Settlement calculations based on the tangent modulus concept*. Bulletin 2. Geotechnical Division. Norwegian Institute of Technology.

Janbu, N. (1970). *Grunnlag i geoteknikk*. Trondheim. Norja.

Janhunen, N. & Pienimäki, M. & Parantala, S. (2015). *Yleiset inframallivaatimukset YIV2015 Osa 4, Inframalli ja mallinnus hankkeen eri suunnitteluvaiheissa Versio 1.0*. buildingSMART Finland. [Viitattu 7.2.2017]. Saatavissa: http://buildingsmart.fi/wp-content/uploads/2016/11/YIV2015_Mallinnusohjeet_OSA4_Mallinnus_hankkeen_eri_vaiheissa_V_1_0.pdf.

Jeong, S. & Murayama, M. & Yamamoto, K. (2005). *Efficient optimization design method using kriging model*. Journal of Aircraft. Vol. 42:2. S. 413-420.

Korhonen, K.-H. & Lojander, M. & Karstunen, M. (1993). *Pehmeikölle maan varaan rakennettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat*. Loppuraportti 3. Tielaitos. Helsinki.

Köylijärvi, S. (2015). *Saven anisotropian ja destruktuurin vaikutuksen mallintaminen Östersundomin koepenkereellä*. Diplomityö. Aalto-Yliopisto. Espoo. 96+44 s.

Larsson, R. & Bengtsson, P.-E. & Eriksson, L. (1997). *Prediction of settlements of embankments on soft, fine grained soils*. Statens Geotekniska Institut. Information 13E. Linköping, Ruotsi. ISSN 0281-7578.

Leroueil, S. & Magnan, J.-P. & Tavenas, F. (1990). *Embankments on soft clays*. Ellis Horwood. ISBN 0-13-275736-2.

Liikennevirasto. (2010). *Tiepenkereiden ja -leikkausten suunnittelu*. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 09/2010.

Liikennevirasto. (2011). *Kevennysrakenteiden suunnittelu*. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 05/2011.

Liikennevirasto. (2017). *Vt 3 ja vt 18 parantaminen, Laihian kohta*. Hanke-esite. [Viitattu 8.2.2017]. Saatavissa: <http://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/143494/Hanke-esite/9d62e5da-7fa5-4203-bcc0-f0aa15a94d5d>

Liukas, J. (2013). *Inframodel –käyttöönotto-ohje, versio 1.0*. PRE InfraFINBIM. Saatavissa: <http://buildingsmart.fi/wp-content/uploads/2014/04/Inframodel3-kayttoohje.pdf>.

Liukas, J. & Kemppainen, L. (2015). *Yleiset inframallivaatimukset YIV2015 Osa 2, Yleiset mallinnusvaatimukset, versio 1.0*. buildingSMART Finland. [Viitattu 7.2.2017]. Saatavissa: http://buildingsmart.fi/wpcontent/uploads/2016/11/YIV2015_Mallinnusohjeet_OSA2_Yleiset_Vaatimukset_V_1_0.pdf.

Lojander, M. & Vepsäläinen, P. (2001). *Haarajoen koepenkereen painumalaskentakilpailu*. Loppuraportti. Tiehallinnon selvityksiä 54/2001. Tiehallinto. Helsinki. ISSN 1457-9871.

Lunne, T. & Berre, T. & Andersen, K.H. & Sjørsen, M. & Mortensen, N. (2008). *Effects of sample disturbance on consolidation behavior of soft marine Norwegian clays*. Teoksessa: Huang A.B. & Mayne P.W. (toim.) *Geotechnical and Geophysical Site Characterization: Proceedings of the 3rd International Conference on Site Characterization*. Taipei, Taiwan 1.-4.4.2008. S. 1471-1479.

Lämsivaara, T. (2000). *Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi*. Tielaitoksen selvityksiä 44/2000. Tielaitos. Helsinki. ISSN 0788-3722.

Löfman, M. (2016). *Perniön saven parametrien luotettavuuden ja saven eriominaisuuksien välisten korrelaatioiden arviointi*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. 121+27 s.

MathWorks. (2017). *MATLAB Documentation*. MathWorks. [Viitattu 1.3.2017]. Saatavissa: <https://se.mathworks.com/help/stats/lognrnd.html>.

Müller, R. (2013). *Probabilistic stability analysis of embankments founded on clay*. Väitöskirja. KTH Royal Institute of Technology. Tukholma. ISBN 1650-9501.

Mäkinen, E. & Tieaho, I. & Parkkari, J. (2016). *Yleiset inframallivaatimukset YIV2015 Osa 8, Inframallin laadunvarmistus*. Versio 1.0. buildingSMART Finland. [Viitattu 7.2.2017]. Saatavissa: http://buildingsmart.fi/wp-content/uploads/2015/02/YIV-2015_OSA_8_Inframallin-laadunvarmistus_20160211.pdf.

Odeh, I.O.A. & McBratney, A.B. & Chittleborough, D.J. (1995). *Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging*. Geoderma. Vol. 67. S. 215-226.

Phoon, K. (2008). *Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications*. Taylor & Francis. ISBN 0-415-39630-1.

Phoon, K. & Kulhawy, F.H. (1999). *Characterization of Geotechnical Variability*. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 36:4. S. 612-624. ISSN 00083674.

PLAXIS. (2016a). *Material models manual*. Plaxis. Alankomaat.

PLAXIS. (2016b). *Reference manual*. Plaxis. Alankomaat.

Potts, D.M. & Zdravković, L. (1999). *Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory*. Thomas Telford. ISBN 0 7277 2753 2

Potts, D.M. & Zdravković, L. (2001). *Finite element analysis in geotechnical engineering: Application*. Thomas Telford. ISBN 0 7277 2783 4

Poulos, H.G. & Davis, E.H. (1974). *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. New York: Wiley.

Ratahallintokeskus. (2005). *Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet*. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B15. Helsinki.

RIL 157-1. Mäkelä H. (toim). (1985). *Geomekaniikka I*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Helsinki. ISBN 951-758-086-X.

Snellman, S. (2015). *Yleiset inframallivaatimukset YIV2015 Osa 5, Rakennemallit; maa-, pohja- ja kalliorakenteet, päälly- ja pintarakenteet, 5.2 Maanrakennustöiden toteutusmallin (koneohjausmalli) laadintaohje*. Versio 1.0. buildingSMART Finland. [Viitattu 8.2.2017]. Saatavissa: http://buildingsmart.fi/wpcontent/uploads/2016/11/YIV2015_Mallinnusohjeet_OSA5_2_Vaylarakenteen_toteutusmallin_laatimisohje_V_1_0.pdf.

Tanttu, K. (2015). *Kallionpintamallin luotettavuuden analysointi porakonekairausten määrän ja laadun perusteella*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. 68+17 s.

Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage*. Leipzig & Wien.

Terzaghi, K. & Peck, R.B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. New York: Wiley.

Uotinen, V.-M. (2017). Diplomi-insinööri, geosiantuntija. Liikennevirasto. Sähköposti 15.3.2017.

Vepsäläinen, P. (1994). *Maanvarainen tiepengerr savikolla. Suunnitteluohje*. Geotekniikan informaatiojulkaisuja. Tielaitoksen selvityksiä 67/1994. Helsinki.

Vepsäläinen, P. & Takala, J. (2004). *Settlement theory manual*. Program SETTLE. Geosuite-projekti. Teknillinen korkeakoulu. Espoo.


```
1 % PINTAPAINUMA versio 1.0 / MATLAB %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % 13.3.2017 Aatu Eteläsaari %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3
4 % Ohjelma laskee kokoonpuristuvuusindeksimenetelmällä painumat annetuilla
5 % penkereen yläpinnalla, maanpinnalla, kaivupinnalla, kevennyksen
6 % yläpinnalla, kuivakuoren alapinnalla (=pohjavedenpinta) ja saven
7 % alapinnalla.
8
9 % Pengerkuorman aiheuttamat jännityslisäykset lasketaan diskretoimalla
10 % pengerkuorma pistekuormiksi ja laskemalla jännityslisäykset Boussinesqin
11 % pistekuorman teorialla superpositioperiaatteella.
12
13 % Maaparametrit annetaan erillisillä funktioilla Cc.m, Cr.m, e0.m ja POP.m,
14 % joita tämä ohjelma kutsuu. Maaparametrit syötetään ko. funktioihin. Laskentapiste- ja kuormapistehilan parametrit
15 % sekä materiaalien tilavuuspainot annetaan tällä ohjelmalla riviltä 66
16 % alkaen.
17
18 % Mikäli käytetään Monte Carlo -simulointia, käytetään myös funktioita
19 % Cc_Monte_Carlo.m, POP_Monte_Carlo.m, kk_Monte_Carlo.m, joihin myös
20 % syötetään parametreja. Kts. diplomityön funktiokaavio.
21
22 % Lisäksi koodissa käytetään funktioita Boussinesq.m ja POP_Boussinesq.m,
23 % niiden arvoja ei tarvitse muuttaa.
24
25 % MUUTA VAIN LÄHTÖARVOJA RIVEILLÄ 66-107, ELLET OLE VARMA MITÄ TEET.
26
27 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
28 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
29
30 clear all
31 clc
32
33 %%%% PINTOJEN LUKU JA PINTAMATRIISIEN MUODOSTUS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
34
35 % Pintatiedostojen tulee olla muodossa:
36 % x1 y1 z1 x2 y2 z2 x3 y3 z3      <-- 1. kolmion kärkien koordinaatit
37 % x1 y1 z1 x2 y2 z2 x3 y3 z3      <-- 2. kolmion kärkien koordinaatit
38 % jne...
39
40 % Pintatiedostojen tulee olla samassa kansiossa tämän tiedoston kanssa ja
41 % tiedostonimien tulee vastata alla olevia.
```



```

124 savi_zmin = min(min(savi(3:3:end,:))); % Saven min z-koordinaatti
125 maa_zmax = max(max(maa(3:3:end,:))); % Maanpinnan max z-koordinaatti
126
127 P_zmin = floor(savi_zmin); % Laskentapistehilan min z
128 P_zmax = ceil(maa_zmax); % Laskentapistehilan max z
129
130 xx=P_xmin:a_x:P_xmax; % Laskentapisteidien x-koordinaattivektori
131 yy=P_ymin:a_y:P_ymax; % Laskentapisteidien y-koordinaattivektori
132 zz=P_zmax:-dz:P_zmin; % Laskentapisteidien z-koordinaattivektori
133
134 P_xlkm=size(xx,2); % Laskentapisteidien lukumäärät
135 P_ylkm=size(yy,2); %
136 P_zlkm=size(zz,2); %
137 P_lkm=P_xlkm*P_ylkm*P_zlkm; %
138
139 P1=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Penkereen z-koordinaatit laskentapisteidien kohdalla
140 P2=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Maanpinnan z-koordinaatit ""
141 P3=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Kaivupinnan z-koordinaatit ""
142 P4=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Kuivakuoren z-koordinaatit ""
143 P5=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Saven ap:n z-koordinaatit ""
144 P6=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Vallitseva jännitys (x,y,z) [kPa]
145 P7=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Ylikonsolidaatio, POP (x,y,z) [kPa]
146 P8=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Jännityslisäys (x,y,z) [kPa]
147 P9=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Cc (x,y,z)
148 P10=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % e0 (x,y,z)
149 P11=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Cr (x,y,z)
150 P12=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Esikonsolidaatiojännitys (x,y,z) [kPa]
151 P13=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Vallitseva+lisäjännitys (x,y,z) [kPa]
152 P14=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm); % Kevennyksen yläpinta laskentapisteidien kohdalla
153
154 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
155
156
157
158 % KUORMAMATRIISIEN MUODOSTUS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
159
160 % Kuormien koordinaattiverkko:
161 xxQ=Q_xmin:b:Q_xmax; % Pistekuormien x-koordinaattivektori
162 yyQ=Q_ymin:b:Q_ymax; % Pistekuormien y-koordinaattivektori
163
164 % Kuormien määrä:

```

```

165 Q_xlkm=size(xxQ,2);
166 Q_ylkm=size(yyQ,2);
167 Q_lkm=Q_xlkm*Q_ylkm;
168
169 % Kuormamatriisien alustus:
170 Qz=zeros(Q_xlkm,Q_ylkm);      % Kuormapisteiden z-koordinaatit (=kaivupinnan z-koordinaatit) x:n ja y:n funktiona
171 Qq=zeros(Q_xlkm,Q_ylkm);      % Kuormien suuruudet x:n ja y:n funktiona
172 Q1=zeros(Q_xlkm,Q_ylkm);      % Penkereen z-koordinaatit kuormapisteiden kohdalla
173 Q2=zeros(Q_xlkm,Q_ylkm);      % Maanpinnan z-koordinaatit kuormapisteiden kohdalla
174 Q4=zeros(Q_xlkm,Q_ylkm);      % Kuivakuoren alapinnan z-koordinaatit kuormapisteiden kohdalla
175 Q5=zeros(Q_xlkm,Q_ylkm);      % Saven alapinnan z-koordinaatit kuormapisteiden kohdalla
176 Q14=zeros(Q_xlkm,Q_ylkm);     % Kevennyksen yläpinnan z-koordinaatit kuormapisteiden kohdalla
177 Qz(:, :)=9999;                % Jos pintaa ei löydy, z=9999
178 Q1(:, :)=9999;                % "
179 Q2(:, :)=9999;                % "
180 Q4(:, :)=9999;                % "
181 Q5(:, :)=9999;                % "
182 Q14(:, :)=9999;               % "
183 disp('Pintojen z-koordinaattien haku...')
184 % Pintojen haku kuormapisteiden kohdalta:
185 for x=1:Q_xlkm
186     for y=1:Q_ylkm
187         for j=1:size(penkka,2)
188             if penkka(1,j)<xxQ(x) && penkka(4,j)<xxQ(x) && penkka(7,j)<xxQ(x)
189                 continue
190             end
191             if penkka(1,j)>xxQ(x) && penkka(4,j)>xxQ(x) && penkka(7,j)>xxQ(x)
192                 continue
193             end
194             if penkka(2,j)<yyQ(y) && penkka(5,j)<yyQ(y) && penkka(8,j)<yyQ(y)
195                 continue
196             end
197             if penkka(2,j)>yyQ(y) && penkka(5,j)>yyQ(y) && penkka(8,j)>yyQ(y)
198                 continue
199             end
200             A=abs((penkka(1,j)*(penkka(5,j)-penkka(8,j))+penkka(4,j)*(penkka(8,j)-penkka(2,j))+penkka(7,j)*(penkka(2,j)-
penkka(5,j)))/2);
201             A1=abs((xxQ(x)*(penkka(5,j)-penkka(8,j))+penkka(4,j)*(penkka(8,j)-yyQ(y))+penkka(7,j)*(yyQ(y)-penkka(5,j)))/2);
202             A2=abs((xxQ(x)*(penkka(8,j)-penkka(2,j))+penkka(7,j)*(penkka(2,j)-yyQ(y))+penkka(1,j)*(yyQ(y)-penkka(8,j)))/2);
203             A3=abs((xxQ(x)*(penkka(2,j)-penkka(5,j))+penkka(1,j)*(penkka(5,j)-yyQ(y))+penkka(4,j)*(yyQ(y)-penkka(2,j)))/2);
204             if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.000001)

```

```

205         Q1(x,y)=A1/A*penkka(3,j)+A2/A*penkka(6,j)+A3/A*penkka(9,j);
206         break
207     end
208 end
209
210 for j=1:size(maa,2)
211     if maa(1,j)<xxQ(x) && maa(4,j)<xxQ(x) && maa(7,j)<xxQ(x)
212         continue
213     end
214     if maa(1,j)>xxQ(x) && maa(4,j)>xxQ(x) && maa(7,j)>xxQ(x)
215         continue
216     end
217     if maa(2,j)<yyQ(y) && maa(5,j)<yyQ(y) && maa(8,j)<yyQ(y)
218         continue
219     end
220     if maa(2,j)>yyQ(y) && maa(5,j)>yyQ(y) && maa(8,j)>yyQ(y)
221         continue
222     end
223     A=abs((maa(1,j)*(maa(5,j)-maa(8,j))+maa(4,j)*(maa(8,j)-maa(2,j))+maa(7,j)*(maa(2,j)-maa(5,j)))/2);
224     A1=abs((xxQ(x)*(maa(5,j)-maa(8,j))+maa(4,j)*(maa(8,j)-yyQ(y))+maa(7,j)*(yyQ(y)-maa(5,j)))/2);
225     A2=abs((xxQ(x)*(maa(8,j)-maa(2,j))+maa(7,j)*(maa(2,j)-yyQ(y))+maa(1,j)*(yyQ(y)-maa(8,j)))/2);
226     A3=abs((xxQ(x)*(maa(2,j)-maa(5,j))+maa(1,j)*(maa(5,j)-yyQ(y))+maa(4,j)*(yyQ(y)-maa(2,j)))/2);
227     if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.000001)
228         Q2(x,y)=A1/A*maa(3,j)+A2/A*maa(6,j)+A3/A*maa(9,j);
229         break
230     end
231 end
232
233 for j=1:size(kaivu,2)
234     if kaivu(1,j)<xxQ(x) && kaivu(4,j)<xxQ(x) && kaivu(7,j)<xxQ(x)
235         continue
236     end
237     if kaivu(1,j)>xxQ(x) && kaivu(4,j)>xxQ(x) && kaivu(7,j)>xxQ(x)
238         continue
239     end
240     if kaivu(2,j)<yyQ(y) && kaivu(5,j)<yyQ(y) && kaivu(8,j)<yyQ(y)
241         continue
242     end
243     if kaivu(2,j)>yyQ(y) && kaivu(5,j)>yyQ(y) && kaivu(8,j)>yyQ(y)
244         continue
245     end

```

```

246     A=abs((kaivu(1,j)*(kaivu(5,j)-kaivu(8,j))+kaivu(4,j)*(kaivu(8,j)-kaivu(2,j))+kaivu(7,j)*(kaivu(2,j)-kaivu(5,
j)))/2);
247     A1=abs((xxQ(x)*(kaivu(5,j)-kaivu(8,j))+kaivu(4,j)*(kaivu(8,j)-yyQ(y))+kaivu(7,j)*(yyQ(y)-kaivu(5,j)))/2);
248     A2=abs((xxQ(x)*(kaivu(8,j)-kaivu(2,j))+kaivu(7,j)*(kaivu(2,j)-yyQ(y))+kaivu(1,j)*(yyQ(y)-kaivu(8,j)))/2);
249     A3=abs((xxQ(x)*(kaivu(2,j)-kaivu(5,j))+kaivu(1,j)*(kaivu(5,j)-yyQ(y))+kaivu(4,j)*(yyQ(y)-kaivu(2,j)))/2);
250     if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.000001)
251         Qz(x,y)=A1/A*kaivu(3,j)+A2/A*kaivu(6,j)+A3/A*kaivu(9,j);
252         break
253     end
254 end
255
256 for j=1:size(kk,2)
257     if kk(1,j)<xxQ(x) && kk(4,j)<xxQ(x) && kk(7,j)<xxQ(x)
258         continue
259     end
260     if kk(1,j)>xxQ(x) && kk(4,j)>xxQ(x) && kk(7,j)>xxQ(x)
261         continue
262     end
263     if kk(2,j)<yyQ(y) && kk(5,j)<yyQ(y) && kk(8,j)<yyQ(y)
264         continue
265     end
266     if kk(2,j)>yyQ(y) && kk(5,j)>yyQ(y) && kk(8,j)>yyQ(y)
267         continue
268     end
269     A=abs((kk(1,j)*(kk(5,j)-kk(8,j))+kk(4,j)*(kk(8,j)-kk(2,j))+kk(7,j)*(kk(2,j)-kk(5,j)))/2);
270     A1=abs((xxQ(x)*(kk(5,j)-kk(8,j))+kk(4,j)*(kk(8,j)-yyQ(y))+kk(7,j)*(yyQ(y)-kk(5,j)))/2);
271     A2=abs((xxQ(x)*(kk(8,j)-kk(2,j))+kk(7,j)*(kk(2,j)-yyQ(y))+kk(1,j)*(yyQ(y)-kk(8,j)))/2);
272     A3=abs((xxQ(x)*(kk(2,j)-kk(5,j))+kk(1,j)*(kk(5,j)-yyQ(y))+kk(4,j)*(yyQ(y)-kk(2,j)))/2);
273     if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.000001)
274         Q4(x,y)=A1/A*kk(3,j)+A2/A*kk(6,j)+A3/A*kk(9,j);
275         break
276     end
277 end
278
279 for j=1:size(savi,2)
280     if savi(1,j)<xxQ(x) && savi(4,j)<xxQ(x) && savi(7,j)<xxQ(x)
281         continue
282     end
283     if savi(1,j)>xxQ(x) && savi(4,j)>xxQ(x) && savi(7,j)>xxQ(x)
284         continue
285     end

```

```

286         if savi(2,j)<yyQ(y) && savi(5,j)<yyQ(y) && savi(8,j)<yyQ(y)
287             continue
288         end
289         if savi(2,j)>yyQ(y) && savi(5,j)>yyQ(y) && savi(8,j)>yyQ(y)
290             continue
291         end
292         A=abs((savi(1,j)*(savi(5,j)-savi(8,j))+savi(4,j)*(savi(8,j)-savi(2,j))+savi(7,j)*(savi(2,j)-savi(5,j)))/2);
293         A1=abs((xxQ(x)*(savi(5,j)-savi(8,j))+savi(4,j)*(savi(8,j)-yyQ(y))+savi(7,j)*(yyQ(y)-savi(5,j)))/2);
294         A2=abs((xxQ(x)*(savi(8,j)-savi(2,j))+savi(7,j)*(savi(2,j)-yyQ(y))+savi(1,j)*(yyQ(y)-savi(8,j)))/2);
295         A3=abs((xxQ(x)*(savi(2,j)-savi(5,j))+savi(1,j)*(savi(5,j)-yyQ(y))+savi(4,j)*(yyQ(y)-savi(2,j)))/2);
296         if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.000001)
297             Q5(x,y)=A1/A*savi(3,j)+A2/A*savi(6,j)+A3/A*savi(9,j);
298             break
299         end
300     end
301
302     for j=1:size(kevennys,2)
303         if kevennys(1,j)<xxQ(x) && kevennys(4,j)<xxQ(x) && kevennys(7,j)<xxQ(x)
304             continue
305         end
306         if kevennys(1,j)>xxQ(x) && kevennys(4,j)>xxQ(x) && kevennys(7,j)>xxQ(x)
307             continue
308         end
309         if kevennys(2,j)<yyQ(y) && kevennys(5,j)<yyQ(y) && kevennys(8,j)<yyQ(y)
310             continue
311         end
312         if kevennys(2,j)>yyQ(y) && kevennys(5,j)>yyQ(y) && kevennys(8,j)>yyQ(y)
313             continue
314         end
315         A=abs((kevennys(1,j)*(kevennys(5,j)-kevennys(8,j))+kevennys(4,j)*(kevennys(8,j)-kevennys(2,j))+kevennys(7,j)*
(kevennys(2,j)-kevennys(5,j)))/2);
316         A1=abs((xxQ(x)*(kevennys(5,j)-kevennys(8,j))+kevennys(4,j)*(kevennys(8,j)-yyQ(y))+kevennys(7,j)*(yyQ(y)-
kevennys(5,j)))/2);
317         A2=abs((xxQ(x)*(kevennys(8,j)-kevennys(2,j))+kevennys(7,j)*(kevennys(2,j)-yyQ(y))+kevennys(1,j)*(yyQ(y)-
kevennys(8,j)))/2);
318         A3=abs((xxQ(x)*(kevennys(2,j)-kevennys(5,j))+kevennys(1,j)*(kevennys(5,j)-yyQ(y))+kevennys(4,j)*(yyQ(y)-
kevennys(2,j)))/2);
319         if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.000001)
320             Q14(x,y)=A1/A*kevennys(3,j)+A2/A*kevennys(6,j)+A3/A*kevennys(9,j);
321             break
322         end

```

```

323         end
324     end
325 end
326
327 % Kaivupinnan asetus maanpintaan, jos pintaa ei löydy tai se on maanpinnan
328 % yläpuolella:
329 erotus=Qz-Q2;
330 ind=find(erotus>0);
331 Qz(ind)=Q2(ind);
332
333 % Kuivakuoren asetus maanpintaan, jos pintaa ei löydy tai se on maanpinnan
334 % yläpuolella:
335 erotus=Q4-Q2;
336 ind=find(erotus>0);
337 Q4(ind)=Q2(ind);
338
339 % Saven ap:n asetus kuivakuoren pintaan, jos pintaa ei löydy tai se on
340 % kuivakuoren yläpuolella:
341 erotus=Q5-Q4;
342 ind=find(erotus>0);
343 Q5(ind)=Q4(ind);
344
345 % Kevennyksen yläpinnan asetus kaivupintaan, jos pintaa ei löydy tai se on
346 % kaivupinnan alapuolella:
347 erotus=Qz-Q14;
348 ind=find(erotus>0);
349 Q14(ind)=Qz(ind);
350 ind2=(find(Q14==9999));
351 Q14(ind2)=Qz(ind2);
352
353 % Pistekuormien suuruden laskenta:
354 penkka_GW_ero=Q1-Q4;
355 kevennys_GW_ero=Q14-Q4;
356 kaivu_GW_ero=Qz-Q4;
357 for x=1:Q_xlkm
358     for y=1:Q_ylkm
359         if kaivu_GW_ero(x,y)>=0
360             Qq(x,y)=((Q1(x,y)-Q14(x,y))*y_penkka+(Q14(x,y)-Qz(x,y))*y_kevennys)*b*b;
361         elseif kevennys_GW_ero(x,y)>=0
362             Qq(x,y)=((Q1(x,y)-Q14(x,y))*y_penkka+(Q14(x,y)-Q4(x,y))*y_kevennys)*b*b;
363         elseif penkka_GW_ero(x,y)>=0

```

```

364         Qq(x,y)=( (Q1(x,y)-Q4(x,y))*y_penkka+(Q4(x,y)-Q14(x,y))*(y_penkka-10))*b*b;
365     else
366         Qq(x,y)=(Q1(x,y)-Q14(x,y))*(y_penkka-10)*b*b;
367     end
368 end
369 end
370
371 Qq(Qq<0)=0;      % Varmistetaan, ettei ole negatiivisia kuormia (penkka kaivupintaa alempana)
372 Qind3=find(Q1==9999);
373 Qq(Qind3)=0;
374
375 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
376
377
378
379 % PINTOJEN Z-KOORDINAATTIEN HAKU LASKENTAPISTEIDEN KOHDALLA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
380
381 P1(:, :, :)=9999;      % Jos pintaa ei löydy, z=9999
382 P2(:, :, :)=9999;      % "
383 P3(:, :, :)=9999;      % "
384 P4(:, :, :)=9999;      % "
385 P5(:, :, :)=9999;      % "
386 P14(:, :, :)=9999;     % "
387 for x=1:P_xlkm
388     for y=1:P_ylkm
389         for j=1:size(penkka,2)
390             if penkka(1,j)<xx(x) && penkka(4,j)<xx(x) && penkka(7,j)<xx(x)
391                 continue
392             end
393             if penkka(1,j)>xx(x) && penkka(4,j)>xx(x) && penkka(7,j)>xx(x)
394                 continue
395             end
396             if penkka(2,j)<yy(y) && penkka(5,j)<yy(y) && penkka(8,j)<yy(y)
397                 continue
398             end
399             if penkka(2,j)>yy(y) && penkka(5,j)>yy(y) && penkka(8,j)>yy(y)
400                 continue
401             end
402             A=abs((penkka(1,j)*(penkka(5,j)-penkka(8,j))+penkka(4,j)*(penkka(8,j)-penkka(2,j))+penkka(7,j)*(penkka(2,j)-
penkka(5,j)))/2);
403             A1=abs((xx(x)*(penkka(5,j)-penkka(8,j))+penkka(4,j)*(penkka(8,j)-yy(y))+penkka(7,j)*(yy(y)-penkka(5,j)))/2);

```



```

404     A2=abs((xx(x)*(penkka(8,j)-penkka(2,j))+penkka(7,j)*(penkka(2,j)-yy(y))+penkka(1,j)*(yy(y)-penkka(8,j)))/2);
405     A3=abs((xx(x)*(penkka(2,j)-penkka(5,j))+penkka(1,j)*(penkka(5,j)-yy(y))+penkka(4,j)*(yy(y)-penkka(2,j)))/2);
406     if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.000001)
407         P1(x,y,:)=A1/A*penkka(3,j)+A2/A*penkka(6,j)+A3/A*penkka(9,j);
408         break
409     end
410 end
411
412 for j=1:size(maa,2)
413     if maa(1,j)<xx(x) && maa(4,j)<xx(x) && maa(7,j)<xx(x)
414         continue
415     end
416     if maa(1,j)>xx(x) && maa(4,j)>xx(x) && maa(7,j)>xx(x)
417         continue
418     end
419     if maa(2,j)<yy(y) && maa(5,j)<yy(y) && maa(8,j)<yy(y)
420         continue
421     end
422     if maa(2,j)>yy(y) && maa(5,j)>yy(y) && maa(8,j)>yy(y)
423         continue
424     end
425     A=abs((maa(1,j)*(maa(5,j)-maa(8,j))+maa(4,j)*(maa(8,j)-maa(2,j))+maa(7,j)*(maa(2,j)-maa(5,j)))/2);
426     A1=abs((xx(x)*(maa(5,j)-maa(8,j))+maa(4,j)*(maa(8,j)-yy(y))+maa(7,j)*(yy(y)-maa(5,j)))/2);
427     A2=abs((xx(x)*(maa(8,j)-maa(2,j))+maa(7,j)*(maa(2,j)-yy(y))+maa(1,j)*(yy(y)-maa(8,j)))/2);
428     A3=abs((xx(x)*(maa(2,j)-maa(5,j))+maa(1,j)*(maa(5,j)-yy(y))+maa(4,j)*(yy(y)-maa(2,j)))/2);
429     if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.000001)
430         P2(x,y,:)=A1/A*maa(3,j)+A2/A*maa(6,j)+A3/A*maa(9,j);
431         break
432     end
433 end
434
435 for j=1:size(kaivu,2)
436     if kaivu(1,j)<xx(x) && kaivu(4,j)<xx(x) && kaivu(7,j)<xx(x)
437         continue
438     end
439     if kaivu(1,j)>xx(x) && kaivu(4,j)>xx(x) && kaivu(7,j)>xx(x)
440         continue
441     end
442     if kaivu(2,j)<yy(y) && kaivu(5,j)<yy(y) && kaivu(8,j)<yy(y)
443         continue
444     end

```

```

445         if kaivu(2,j)>yy(y) && kaivu(5,j)>yy(y) && kaivu(8,j)>yy(y)
446             continue
447         end
448         A=abs((kaivu(1,j)*(kaivu(5,j)-kaivu(8,j))+kaivu(4,j)*(kaivu(8,j)-kaivu(2,j))+kaivu(7,j)*(kaivu(2,j)-kaivu(5,
j)))/2);
449         A1=abs((xx(x)*(kaivu(5,j)-kaivu(8,j))+kaivu(4,j)*(kaivu(8,j)-yy(y))+kaivu(7,j)*(yy(y)-kaivu(5,j)))/2);
450         A2=abs((xx(x)*(kaivu(8,j)-kaivu(2,j))+kaivu(7,j)*(kaivu(2,j)-yy(y))+kaivu(1,j)*(yy(y)-kaivu(8,j)))/2);
451         A3=abs((xx(x)*(kaivu(2,j)-kaivu(5,j))+kaivu(1,j)*(kaivu(5,j)-yy(y))+kaivu(4,j)*(yy(y)-kaivu(2,j)))/2);
452         if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&(A1+A2+A3)/A<=1.000001)
453             P3(x,y,:)=A1/A*kaivu(3,j)+A2/A*kaivu(6,j)+A3/A*kaivu(9,j);
454             break
455         end
456     end
457
458     for j=1:size(kk,2)
459         if kk(1,j)<xx(x) && kk(4,j)<xx(x) && kk(7,j)<xx(x)
460             continue
461         end
462         if kk(1,j)>xx(x) && kk(4,j)>xx(x) && kk(7,j)>xx(x)
463             continue
464         end
465         if kk(2,j)<yy(y) && kk(5,j)<yy(y) && kk(8,j)<yy(y)
466             continue
467         end
468         if kk(2,j)>yy(y) && kk(5,j)>yy(y) && kk(8,j)>yy(y)
469             continue
470         end
471         A=abs((kk(1,j)*(kk(5,j)-kk(8,j))+kk(4,j)*(kk(8,j)-kk(2,j))+kk(7,j)*(kk(2,j)-kk(5,j)))/2);
472         A1=abs((xx(x)*(kk(5,j)-kk(8,j))+kk(4,j)*(kk(8,j)-yy(y))+kk(7,j)*(yy(y)-kk(5,j)))/2);
473         A2=abs((xx(x)*(kk(8,j)-kk(2,j))+kk(7,j)*(kk(2,j)-yy(y))+kk(1,j)*(yy(y)-kk(8,j)))/2);
474         A3=abs((xx(x)*(kk(2,j)-kk(5,j))+kk(1,j)*(kk(5,j)-yy(y))+kk(4,j)*(yy(y)-kk(2,j)))/2);
475         if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&(A1+A2+A3)/A<=1.000001)
476             P4(x,y,:)=A1/A*kk(3,j)+A2/A*kk(6,j)+A3/A*kk(9,j);
477             break
478         end
479     end
480
481     for j=1:size(savi,2)
482         if savi(1,j)<xx(x) && savi(4,j)<xx(x) && savi(7,j)<xx(x)
483             continue
484         end

```

```

485         if savi(1,j)>xx(x) && savi(4,j)>xx(x) && savi(7,j)>xx(x)
486             continue
487         end
488         if savi(2,j)<yy(y) && savi(5,j)<yy(y) && savi(8,j)<yy(y)
489             continue
490         end
491         if savi(2,j)>yy(y) && savi(5,j)>yy(y) && savi(8,j)>yy(y)
492             continue
493         end
494         A=abs((savi(1,j)*(savi(5,j)-savi(8,j))+savi(4,j)*(savi(8,j)-savi(2,j))+savi(7,j)*(savi(2,j)-savi(5,j)))/2);
495         A1=abs((xx(x)*(savi(5,j)-savi(8,j))+savi(4,j)*(savi(8,j)-yy(y))+savi(7,j)*(yy(y)-savi(5,j)))/2);
496         A2=abs((xx(x)*(savi(8,j)-savi(2,j))+savi(7,j)*(savi(2,j)-yy(y))+savi(1,j)*(yy(y)-savi(8,j)))/2);
497         A3=abs((xx(x)*(savi(2,j)-savi(5,j))+savi(1,j)*(savi(5,j)-yy(y))+savi(4,j)*(yy(y)-savi(2,j)))/2);
498         if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.000001)
499             P5(x,y,:)=A1/A*savi(3,j)+A2/A*savi(6,j)+A3/A*savi(9,j);
500             break
501         end
502     end
503
504     for j=1:size(kevennys,2)
505         if kevennys(1,j)<xx(x) && kevennys(4,j)<xx(x) && kevennys(7,j)<xx(x)
506             continue
507         end
508         if kevennys(1,j)>xx(x) && kevennys(4,j)>xx(x) && kevennys(7,j)>xx(x)
509             continue
510         end
511         if kevennys(2,j)<yy(y) && kevennys(5,j)<yy(y) && kevennys(8,j)<yy(y)
512             continue
513         end
514         if kevennys(2,j)>yy(y) && kevennys(5,j)>yy(y) && kevennys(8,j)>yy(y)
515             continue
516         end
517         A=abs((kevennys(1,j)*(kevennys(5,j)-kevennys(8,j))+kevennys(4,j)*(kevennys(8,j)-kevennys(2,j))+kevennys(7,j)*
(kevennys(2,j)-kevennys(5,j)))/2);
518         A1=abs((xx(x)*(kevennys(5,j)-kevennys(8,j))+kevennys(4,j)*(kevennys(8,j)-yy(y))+kevennys(7,j)*(yy(y)-kevennys
(5,j)))/2);
519         A2=abs((xx(x)*(kevennys(8,j)-kevennys(2,j))+kevennys(7,j)*(kevennys(2,j)-yy(y))+kevennys(1,j)*(yy(y)-kevennys
(8,j)))/2);
520         A3=abs((xx(x)*(kevennys(2,j)-kevennys(5,j))+kevennys(1,j)*(kevennys(5,j)-yy(y))+kevennys(4,j)*(yy(y)-kevennys
(2,j)))/2);
521         if (0.999999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.000001)

```

[illegible]

```

563 for x=1:size(xxQ,2)
564     for y=1:size(yyQ,2)
565         if Q1_1(x,y)==9999
566             Q1_1(x,y)=Qz(x,y);
567         end
568     end
569 end
570 set(0,'defaultAxesFontSize', 15)
571 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
572 a1=surf(xxQ,yyQ,transpose(Q1_1));
573 alpha(a1,1);
574 hold on
575 a2=surf(xxQ,yyQ,transpose(Q2));
576 alpha(a2,1);
577 a3=surf(xxQ,yyQ,transpose(Qz));
578 alpha(a3,1);
579 a4=surf(xxQ,yyQ,transpose(Q4));
580 alpha(a4,1);
581 a5=surf(xxQ,yyQ,transpose(Q5));
582 alpha(a5,1);
583 a6=surf(xx,yy,transpose(P14(:,:,1)));
584 alpha(a6,1);
585 surf(xx,yy,transpose(P5(:,:,1)));
586 hold off
587 title('Jännityslisäysten laskennassa käytetty penger, alueen pinnat ja laskentapisteiden alue');
588 axis equal
589 daspect([10 10 1])
590
591
592 % Tulostetaan näkyviin tiedot laskentapisteiden määristä:
593 P_horisontaali=P_xlkm*P_ylkm % Laskentapisteiden lukumäärä vaakasuunnassa
594 P_lkm % Laskentapisteiden lukumäärä kaikkiaan
595 Q_lkm % Pistekuormien lukumäärä
596 kuormien_hyotysuhde=sum(Qq(:)>0)/Q_lkm % Kuormapisteet penkereen kohdalla / Kaikki kuormapisteet
597 laskentapisteiden_hyotysuhde=sum(P1(:)<9999)/P_lkm % Laskentapisteet penkereen kohdalla / Kaikki laskentapisteet
598 simuloinnit_lkm % Monte Carlo -simulointien lukumäärä. 1 = Deterministinen
599 Cc_variointi
600 POP_variointi
601 kk_variointi
602 keyboard; % Pysäytys aluerajauskuvan tarkasteluun. Onko aluerajaus oikein?
603

```

```

604 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
605
606
607
608 % VALLITSEVIEN JÄNNITYSTEN LASKENTA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
609
610 for x=1:P_xlkm
611     for y=1:P_ylkm
612         ind=find(zz>=P4(x,y,1));
613         P6(x,y,ind)=(P2(x,y,1)-zz(ind))*y_kk;
614         ind=find(zz<P4(x,y,1));
615         P6(x,y,ind)=(P2(x,y,1)-P4(x,y,1))*y_kk+(P4(x,y,1)-zz(ind))*y_savi;
616     end
617 end
618
619 % Kuva,leikkaus y-akselin suunnassa annetulla x, vallitseva jännitys alussa
620 a=zeros(P_zlkm,P_ylkm);
621 for i=1:P_zlkm
622     a(i,:)= P6(find(xx==leikkaus_x),:,i);
623 end
624 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
625 contourf(yy,zz,a,'ShowText','on');
626 hold on
627 plot (yy,P2(find(xx==leikkaus_x),:,1),'b','Linewidth',2);
628 plot (yy,P4(find(xx==leikkaus_x),:,1),'m','Linewidth',2);
629 plot (yy,P5(find(xx==leikkaus_x),:,1),'c','Linewidth',2);
630 hold off
631 legend('','Maanpinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
632 title(sprintf('Poikkileikkaus, x = %i, vallitseva jännitys alussa [kPa]', leikkaus_x));
633
634 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
635
636
637
638 % KAIVUSTA AIHEUTUVA YLIKONSOLIDAATIO JA VALLITSEVAN JÄNNITYKSEN MUUTOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
639
640 % Ylikonsolidaation määrittäminen alussa, funktio POP.m
641 P7=POP(P7);
642
643 % Kuva, leikkaus y-akselin suunnassa annetulla x, POP alussa
644 a1=zeros(P_zlkm,P_ylkm);

```

```

645 for i=1:P_xlkm
646     a1(i,:)= P7(find(xx==leikkaus_x),:,i);
647 end
648 a1(1,1)=1;
649 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
650 contourf(yy,zz,a1,'ShowText','on');
651 hold on
652 plot (yy,P2(ceil(P_xlkm/2),:,1),'b','Linewidth',2);
653 plot (yy,P4(ceil(P_xlkm/2),:,1),'m','Linewidth',2);
654 plot (yy,P5(ceil(P_xlkm/2),:,1),'c','Linewidth',2);
655 hold off
656 legend('','Maanpinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
657 grid on
658 title(sprintf('x = %i, POP alussa [kPa]', leikkaus_x));
659
660 % Kuva, leikkaus y-akselin suunnassa annetulla x, esikonsolidaatiojännitys alussa
661 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
662 contourf(yy,zz,a+a1,'ShowText','on');
663 hold on
664 plot (yy,P2(find(xx==leikkaus_x),:,1),'b','linewidth',2);
665 plot (yy,P4(find(xx==leikkaus_x),:,1),'m','Linewidth',2);
666 plot (yy,P5(find(xx==leikkaus_x),:,1),'c','Linewidth',2);
667 hold off
668 legend('','Maanpinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
669 grid on
670 title(sprintf('x = %i, Esikonsolidaatiojännitys alussa [kPa]', leikkaus_x));
671
672 % Kaivun "negatiivisten kuormien" koordinaattiverkko:
673 POP_xmin = Q_xmin;
674 POP_xmax = Q_xmax;
675 POP_ymin = Q_ymin;
676 POP_ymax = Q_ymax;
677 xxPOP=POP_xmin:b:POP_xmax;
678 yyPOP=POP_ymin:b:POP_ymax;
679
680 % Kuormien määrä:
681 POP_xlkm=size(xxPOP,2);
682 POP_ylkm=size(yyPOP,2);
683 POP_lkm=POP_xlkm*POP_ylkm;
684
685 % Kuormamatriisien alustus:

```

```

686 POPz=zeros(POP_xlkm,POP_ylkm);
687 POPq=zeros(POP_xlkm,POP_ylkm);
688 POP2=zeros(POP_xlkm,POP_ylkm);
689 POP4=zeros(POP_xlkm,POP_ylkm);
690 POPz(:,:)=9999;
691 POP2(:,:)=9999;
692 POP4(:,:)=9999;
693 disp('Pintojen z-koordinaattien haku...')
694 % Pintojen haku negatiivisten kuormapisteiden kohdalta:
695 for x=1:POP_xlkm
696     for y=1:POP_ylkm
697         for j=1:size(maa,2)
698             if maa(1,j)<xxPOP(x) && maa(4,j)<xxPOP(x) && maa(7,j)<xxPOP(x)
699                 continue
700             end
701             if maa(1,j)>xxPOP(x) && maa(4,j)>xxPOP(x) && maa(7,j)>xxPOP(x)
702                 continue
703             end
704             if maa(2,j)<yyPOP(y) && maa(5,j)<yyPOP(y) && maa(8,j)<yyPOP(y)
705                 continue
706             end
707             if maa(2,j)>yyPOP(y) && maa(5,j)>yyPOP(y) && maa(8,j)>yyPOP(y)
708                 continue
709             end
710             A=abs((maa(1,j)*(maa(5,j)-maa(8,j))+maa(4,j)*(maa(8,j)-maa(2,j))+maa(7,j)*(maa(2,j)-maa(5,j)))/2);
711             A1=abs((xxPOP(x)*(maa(5,j)-maa(8,j))+maa(4,j)*(maa(8,j)-yyPOP(y))+maa(7,j)*(yyPOP(y)-maa(5,j)))/2);
712             A2=abs((xxPOP(x)*(maa(8,j)-maa(2,j))+maa(7,j)*(maa(2,j)-yyPOP(y))+maa(1,j)*(yyPOP(y)-maa(8,j)))/2);
713             A3=abs((xxPOP(x)*(maa(2,j)-maa(5,j))+maa(1,j)*(maa(5,j)-yyPOP(y))+maa(4,j)*(yyPOP(y)-maa(2,j)))/2);
714             if (0.9999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.0001)
715                 POP2(x,y)=A1/A*maa(3,j)+A2/A*maa(6,j)+A3/A*maa(9,j);
716                 break
717             end
718         end
719     end
720     for j=1:size(kaivu,2)
721         if kaivu(1,j)<xxPOP(x) && kaivu(4,j)<xxPOP(x) && kaivu(7,j)<xxPOP(x)
722             continue
723         end
724         if kaivu(1,j)>xxPOP(x) && kaivu(4,j)>xxPOP(x) && kaivu(7,j)>xxPOP(x)
725             continue
726         end

```



```

727         if kaivu(2,j)<yyPOP(y) && kaivu(5,j)<yyPOP(y) && kaivu(8,j)<yyPOP(y)
728             continue
729         end
730         if kaivu(2,j)>yyPOP(y) && kaivu(5,j)>yyPOP(y) && kaivu(8,j)>yyPOP(y)
731             continue
732         end
733         A=abs((kaivu(1,j)*(kaivu(5,j)-kaivu(8,j))+kaivu(4,j)*(kaivu(8,j)-kaivu(2,j))+kaivu(7,j)*(kaivu(2,j)-kaivu(5,j)))/2);
734         A1=abs((xxPOP(x)*(kaivu(5,j)-kaivu(8,j))+kaivu(4,j)*(kaivu(8,j)-yyPOP(y))+kaivu(7,j)*(yyPOP(y)-kaivu(5,j)))/2);
735         A2=abs((xxPOP(x)*(kaivu(8,j)-kaivu(2,j))+kaivu(7,j)*(kaivu(2,j)-yyPOP(y))+kaivu(1,j)*(yyPOP(y)-kaivu(8,j)))/2);
736         A3=abs((xxPOP(x)*(kaivu(2,j)-kaivu(5,j))+kaivu(1,j)*(kaivu(5,j)-yyPOP(y))+kaivu(4,j)*(yyPOP(y)-kaivu(2,j)))/2);
737         if (0.9999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.0001)
738             POPz(x,y)=A1/A*kaivu(3,j)+A2/A*kaivu(6,j)+A3/A*kaivu(9,j);
739             break
740         end
741     end
742
743     for j=1:size(kk,2)
744         if kk(1,j)<xxPOP(x) && kk(4,j)<xxPOP(x) && kk(7,j)<xxPOP(x)
745             continue
746         end
747         if kk(1,j)>xxPOP(x) && kk(4,j)>xxPOP(x) && kk(7,j)>xxPOP(x)
748             continue
749         end
750         if kk(2,j)<yyPOP(y) && kk(5,j)<yyPOP(y) && kk(8,j)<yyPOP(y)
751             continue
752         end
753         if kk(2,j)>yyPOP(y) && kk(5,j)>yyPOP(y) && kk(8,j)>yyPOP(y)
754             continue
755         end
756         A=abs((kk(1,j)*(kk(5,j)-kk(8,j))+kk(4,j)*(kk(8,j)-kk(2,j))+kk(7,j)*(kk(2,j)-kk(5,j)))/2);
757         A1=abs((xxPOP(x)*(kk(5,j)-kk(8,j))+kk(4,j)*(kk(8,j)-yyPOP(y))+kk(7,j)*(yyPOP(y)-kk(5,j)))/2);
758         A2=abs((xxPOP(x)*(kk(8,j)-kk(2,j))+kk(7,j)*(kk(2,j)-yyPOP(y))+kk(1,j)*(yyPOP(y)-kk(8,j)))/2);
759         A3=abs((xxPOP(x)*(kk(2,j)-kk(5,j))+kk(1,j)*(kk(5,j)-yyPOP(y))+kk(4,j)*(yyPOP(y)-kk(2,j)))/2);
760         if (0.9999<=(A1+A2+A3)/A)&&((A1+A2+A3)/A<=1.0001)
761             POP4(x,y)=A1/A*kk(3,j)+A2/A*kk(6,j)+A3/A*kk(9,j);
762             break
763         end
764     end
765
766 end

```

```

767 end
768
769 % Kaivupinnan asetus maanpintaan, jos pintaa ei löydy tai se on maanpinnan
770 % yläpuolella:
771 erotus=POPz-POP2;
772 ind=find(erotus>0);
773 POPz(ind)=POP2(ind);
774
775 % Kuivakuoren asetus maanpintaan, jos pintaa ei löydy tai se on maanpinnan
776 % yläpuolella:
777 erotus=POP4-POP2;
778 ind=find(erotus>0);
779 POP4(ind)=POP2(ind);
780
781 % Kaivun aiheuttaman "negatiivisen kuorman" suuruuden laskenta
782 kaivu_GW_ero=POPz-POP4;
783 for x=1:POP_xlkm
784     for y=1:POP_ylkm
785         if kaivu_GW_ero(x,y)>=0
786             POPq(x,y)=(POP2(x,y)-POPz(x,y))*y_kk*b*b;
787         else
788             POPq(x,y)=( (POP2(x,y)-POP4(x,y))*y_kk+(POP4(x,y)-POPz(x,y))*y_savi)*b*b;
789         end
790     end
791 end
792 POPq(POPq<0)=0;
793
794 % Kaivusta aiheutuvien jännitysmuutosten laskenta Boussinesqin pistekuorman
795 % teorialla "käänteisesti". Funktio POP_Boussinesq.m
796 if size(kaivu,2)==1
797     muutos=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm);
798 else
799     muutos=POP_Boussinesq(POP_xlkm,POP_ylkm,xxPOP,yyPOP,xx,yy,zz,POPz,POPq,P1) ;
800 end
801
802
803 % Jännitysten muutokset
804 P6=P6-muutos; % Vallitseva tehokas pystyjännitys kaivun jälkeen
805 P7=P7+muutos; % POP-arvot kaivun jälkeen
806
807 P_z_arvot=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm);

```

```

808 for z=1:P_zlkm
809     P_z_arvot(:,z)=zz(z);
810 end
811
812 % Kuva, leikkaus y-akselin suunnassa annetulla x, vallitseva jännitys kaivun
813 % jälkeen
814 a=zeros(P_zlkm,P_ylkm);
815 for i=1:P_zlkm
816     a(i,:)= P6(find(xx==leikkaus_x),:,i);
817 end
818 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
819 contourf(yy,zz,a,'ShowText','on');
820 hold on
821 plot (yy,P2(find(xx==leikkaus_x),:,1),'b','linewidth',2);
822 plot (yy,P3(find(xx==leikkaus_x),:,1),'r','linewidth',2);
823 plot (yy,P4(find(xx==leikkaus_x),:,1),'m','linewidth',2);
824 plot (yy,P5(find(xx==leikkaus_x),:,1),'c','linewidth',2);
825 hold off
826 legend('','Maanpinta','Kaivupinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
827 grid on
828 title(sprintf('x = %i, Vallitseva jännitys kaivun jälkeen [kPa]', leikkaus_x));
829
830 % Kuva, leikkaus y-akselin suunnassa annetulla x, ylikonsolidaatio POP
831 % kaivun jälkeen
832 a1=zeros(P_zlkm,P_ylkm);
833 for i=1:P_zlkm
834     a1(i,:)= P7(find(xx==leikkaus_x),:,i);
835 end
836 a1(1,1)=1;
837 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
838 contourf(yy,zz,a1,'ShowText','on');
839 hold on
840 plot (yy,P2(find(xx==leikkaus_x),:,1),'b','linewidth',2);
841 plot (yy,P3(find(xx==leikkaus_x),:,1),'r','linewidth',2);
842 plot (yy,P4(find(xx==leikkaus_x),:,1),'m','linewidth',2);
843 plot (yy,P5(find(xx==leikkaus_x),:,1),'c','linewidth',2);
844 hold off
845 legend('','Maanpinta','Kaivupinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
846 grid on
847 title(sprintf('x = %i, POP kaivun jälkeen [kPa]', leikkaus_x));
848

```

[illegible]

```

890 % LASKENTAPISTEIDEN PAINUMA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
891
892 % Painumaparametrit määritetään erillisten funktioiden Cc.m, e0.m ja Cr.m
893 % avulla. POP määritetty aiemmin.
894 kk_virhe=0;
895 P9=Cc(P4,P9,P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm,zz,kk_virhe);
896 P10=e0(P4,P10,P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm,zz);
897 P11=Cr(P4,P11,P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm,zz);
898
899 % Tällä säädellään minkä pisteiden painumat lasketaan. Eli jos piste on
900 % kaivupinnan yläpuolella tai saven alapinnan alapuolella, Cc=0 ja Cr=0 eli painuma
901 % näin ollen S=0. Lisäksi numeeristen äärettömyys-/nollalla jakovirheiden
902 % välttämiseksi muutetaan vallitseva jännitys ja esikonsolidaatiojännitys
903 % arvolla 0 arvoon 1 kPa
904 Pz_savi_ero=P_z_arvot-P5;
905 ind=find(Pz_savi_ero<dz/2); % Pisteet saven alapinnan alapuolella
906 P9(ind)=0;
907 P11(ind)=0;
908 Pz_kaivu_ero=P_z_arvot-P3;
909 ind2=find(Pz_kaivu_ero>-dz/2); % Pisteet kaivupinnan yläpuolella
910 P9(ind2)=0;
911 P11(ind2)=0;
912 P12(P12<1)=1;
913 P6(P6<1)=1;
914
915 % Ylikonsolidoituneen osan painumat
916 erotus=P12-P13; % Esikonsolidaatiojännitys - (Vallitseva+lisä)
917 ind1=find(erotus>=0); % Pisteet, joissa Esikonsolidaatiojännitys >= Vallitseva+lisä
918 ind2=find(erotus<0); % Pisteet, joissa Esikonsolidaatiojännitys < Vallitseva+lisä
919 sig_per_sig0=P13./P6; % (Vallitseva+lisä) / Vallitseva
920 sig_p_per_sig0=P12./P6; % Esikonsolidaatiojännitys / Vallitseva
921 sig_per_sig0(sig_per_sig0<1)=1;
922 sig_p_per_sig0(sig_p_per_sig0<1)=1;
923 apu1=abs(sig_per_sig0);
924 apu2=abs(sig_p_per_sig0);
925 log_1=log10(apu1);
926 log_2=log10(apu2);
927 Crlog1=P11.*log_1;
928 Crlog2=P11.*log_2;
929 e_jako=P10+1;
930 e_jako1=1./e_jako;

```

```

931     epsilon_YK1=e_jakol.*Crlog1;
932     epsilon_YK2=e_jakol.*Crlog2;
933     epsilon_YK=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm);
934     epsilon_YK(ind1)=epsilon_YK1(ind1);
935     epsilon_YK(ind2)=epsilon_YK2(ind2);
936     S1_YK=dz*epsilon_YK;
937     erotus1=P13-P6;
938     erotus2=P12-P6;
939     ind1=find(erotus1<=0);
940     ind2=find(erotus2<=0);
941     S1_YK(ind1)=0;
942     S1_YK(ind2)=0;
943     S_YK=zeros(P_xlkm,P_ylkm);
944
945     for x=1:P_xlkm
946         for y=1:P_ylkm
947             S_YK(x,y)=sum(S1_YK(x,y,:));
948         end
949     end
950     S_YK(S_YK<0)=0;
951
952     % Normaalikonsolidoituneen osan painumat
953     sig0_dsig_per_sig_p=P13./P12;
954     sig0_dsig_per_sig_p(sig0_dsig_per_sig_p<1)=1;
955     apu3=abs(sig0_dsig_per_sig_p);
956     log_=log10(apu3);
957     Cclog=P9.*log_;
958     epsilon_NK=e_jakol.*Cclog;
959     S1_NK=dz*epsilon_NK;
960     S_NK=zeros(P_xlkm,P_ylkm);
961
962     for x=1:P_xlkm
963         for y=1:P_ylkm
964             S_NK(x,y)=sum(S1_NK(x,y,:));
965         end
966     end
967
968     S_inkr(:,: ,laskuri)=(S_YK+S_NK);
969     Qq=Qq+inkr_kuorma-(S_inkr(:,: ,laskuri)-S_inkr(:,: ,laskuri-1))*b*b*10;
970 end
971

```

```

972     S=-S_inkr(:,:1/inkrementti+1);
973
974 else
975     % JÄNNITYSLISÄYSTEN LASKENTA, funktio Boussinesq.m %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
976     disp('Jännityslisäysten laskenta...')
977     P8=Boussinesq(Q_xlkm,Q_ylkm,xxQ,yyQ,xx,yy,zz,Qz,Qq,P1);
978
979     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
980
981
982
983     % ESIKONSOLIDAATIOJÄNNITYKSEN JA VALLITSEVAN+LISÄJÄNNITYKSEN LASKENTA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
984
985     P12=P6+P7; % Esikonsolidaatiojännitys
986     P13=P6+P8; % Vallitseva+lisäjännitys
987
988     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
989
990     P12_a=P12; % Apumatriisi POP:n varioinnissa
991     P4_a=P4;   % Apumatriisi kk:n alapinnan varioinnissa
992
993     % LASKENTAPISTEIDEN PAINUMA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
994
995     if simuloinnit_lkm > 1
996         Cc_kk_vektori=zeros(simuloinnit_lkm,1);
997         Cc_1_vektori=zeros(simuloinnit_lkm,1);
998         Cc_2_vektori=zeros(simuloinnit_lkm,1);
999         Cc_3_vektori=zeros(simuloinnit_lkm,1);
1000        Cc_4_vektori=zeros(simuloinnit_lkm,1);
1001        Cc_5_vektori=zeros(simuloinnit_lkm,1);
1002        POP_vektori=zeros(simuloinnit_lkm,1);
1003        POP_vektori(:)=P7(1);
1004        kk_vektori=zeros(simuloinnit_lkm,1);
1005     end
1006
1007     S=zeros(P_xlkm,P_ylkm,simuloinnit_lkm);
1008
1009     for simulointi_nro=1:simuloinnit_lkm
1010
1011         simulointi_nro
1012

```

```

1013 % Ylikonsolidaation variointi
1014 if simuloinnit_lkm > 1 && POP_variointi == 1
1015     P12=P12_a;
1016     P12=P12-P7;
1017     POP_lisays = POP_Monte_Carlo(P7);
1018     if P7(1)+POP_lisays(1)<0
1019         POP_lisays(:)=0;
1020     end
1021     P7=P7+POP_lisays;
1022     POP_vektori(simulointi_nro)=POP_vektori(simulointi_nro)+POP_lisays(1);
1023     P12=P12+P7;
1024 end
1025
1026 % Kuivakuoren alapinnan variointi
1027 if simuloinnit_lkm > 1 && kk_variointi == 1
1028     kk_virhe=kk_Monte_Carlo(P4);
1029     P4=P4+kk_virhe;
1030     kk_vektori(simulointi_nro)=kk_virhe;
1031     for x=1:P_xlkm
1032         for y=1:P_ylkm
1033             ind=find(zz>=P4(x,y,1));
1034             P6(x,y,ind)=(P2(x,y,1)-zz(ind))*y_kk;
1035             ind=find(zz<P4(x,y,1));
1036             P6(x,y,ind)=(P2(x,y,1)-P4(x,y,1))*y_kk+(P4(x,y,1)-zz(ind))*y_savi;
1037         end
1038     end
1039     P6=P6-muutos;
1040     P12=P6+P7;
1041     P13=P6+P8;
1042 else
1043     kk_virhe=0;
1044 end
1045
1046 % Kokoonpuristuvuusindeksin variointi
1047 if simuloinnit_lkm > 1 && Cc_variointi == 1
1048     [P9, Cc_kk, Cc_1, Cc_2, Cc_3, Cc_4, Cc_5] = Cc_Monte_Carlo(P4,P9,P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm,zz,kk_virhe);
1049     Cc_kk_vektori(simulointi_nro)=Cc_kk;
1050     Cc_1_vektori(simulointi_nro)=Cc_1;
1051     Cc_2_vektori(simulointi_nro)=Cc_2;
1052     Cc_3_vektori(simulointi_nro)=Cc_3;
1053     Cc_4_vektori(simulointi_nro)=Cc_4;

```



```

1054         Cc_5_vektori(simulointi_nro)=Cc_5;
1055     else
1056         [P9, Cc_kk, Cc_1, Cc_2, Cc_3, Cc_4, Cc_5] = Cc(P4,P9,P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm,zz,kk_virhe);
1057         Cc_kk_vektori(simulointi_nro)=Cc_kk;
1058         Cc_1_vektori(simulointi_nro)=Cc_1;
1059         Cc_2_vektori(simulointi_nro)=Cc_2;
1060         Cc_3_vektori(simulointi_nro)=Cc_3;
1061         Cc_4_vektori(simulointi_nro)=Cc_4;
1062         Cc_5_vektori(simulointi_nro)=Cc_5;
1063     end
1064
1065     P10=e0(P4,P10,P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm,zz);
1066     P11=Cr(P4,P11,P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm,zz);
1067
1068     % Tällä säädellään minkä pisteiden painumat lasketaan. Eli jos piste on
1069     % kaivupinnan yläpuolella tai saven alapinnan alapuolella, Cc=0 ja Cr=0 eli painuma
1070     % näin ollen S=0. Lisäksi numeeristen äärettömyys-/nollallajakovirheiden
1071     % välttämiseksi muutetaan vallitseva jännitys ja esikonsolidaatiojännitys
1072     % arvolla 0 arvoon 1 kPa
1073     Pz_savi_ero=P_z_arvot-P5;
1074     ind=find(Pz_savi_ero<dz/2);          % Pisteet saven alapinnan alapuolella
1075     P9(ind)=0;
1076     P11(ind)=0;
1077     Pz_kaivu_ero=P_z_arvot-P3;
1078     ind2=find(Pz_kaivu_ero>-dz/2);       % Pisteet kaivupinnan yläpuolella
1079     P9(ind2)=0;
1080     P11(ind2)=0;
1081     P12(P12<1)=1;
1082     P6(P6<1)=1;
1083
1084     % Ylikonsolidoituneen osan painumat
1085     erotus=P12-P13;                      % Esikonsolidaatiojännitys - (Vallitseva+lisä)
1086     ind1=find(erotus>=0);                % Pisteet, joissa Esikonsolidaatiojännitys >= Vallitseva+lisä
1087     ind2=find(erotus<0);                % Pisteet, joissa Esikonsolidaatiojännitys < Vallitseva+lisä
1088     sig_per_sig0=P13./P6;               % (Vallitseva+lisä) / Vallitseva
1089     sig_p_per_sig0=P12./P6;             % Esikonsolidaatiojännitys / Vallitseva
1090     sig_per_sig0(sig_per_sig0<1)=1;
1091     sig_p_per_sig0(sig_p_per_sig0<1)=1;
1092     apu1=abs(sig_per_sig0);
1093     apu2=abs(sig_p_per_sig0);
1094     log_1=log10(apu1);

```

```

1095     log_2=log10(apu2);
1096     Crlog1=P11.*log_1;
1097     Crlog2=P11.*log_2;
1098     e_jako=P10+1;
1099     e_jako1=1./e_jako;
1100     epsilon_YK1=e_jako1.*Crlog1;
1101     epsilon_YK2=e_jako1.*Crlog2;
1102     epsilon_YK=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm);
1103     epsilon_YK(ind1)=epsilon_YK1(ind1);
1104     epsilon_YK(ind2)=epsilon_YK2(ind2);
1105     S1_YK=dz*epsilon_YK;
1106     erotus1=P13-P6;
1107     erotus2=P12-P6;
1108     ind1=find(erotus1<=0);
1109     ind2=find(erotus2<=0);
1110     S1_YK(ind1)=0;
1111     S1_YK(ind2)=0;
1112     S_YK=zeros(P_xlkm,P_ylkm);
1113     for x=1:P_xlkm
1114         for y=1:P_ylkm
1115             S_YK(x,y)=sum(S1_YK(x,y,:));
1116         end
1117     end
1118     S_YK(S_YK<0)=0;
1119
1120     % Normaalikonsolidoituneen osan painumat
1121     sig0_dsig_per_sig_p=P13./P12;
1122     sig0_dsig_per_sig_p(sig0_dsig_per_sig_p<1)=1;
1123     apu3=abs(sig0_dsig_per_sig_p);
1124     log_=log10(apu3);
1125     Cclog=P9.*log_;
1126     epsilon_NK=e_jako1.*Cclog;
1127     S1_NK=dz*epsilon_NK;
1128     S_NK=zeros(P_xlkm,P_ylkm);
1129     for x=1:P_xlkm
1130         for y=1:P_ylkm
1131             S_NK(x,y)=sum(S1_NK(x,y,:));
1132         end
1133     end
1134
1135     % POP-matriisin "nollaus" lähtötilanteeseen

```

```

1136     P7=POP(P7);
1137
1138     % P4-matriisin "nollaus" lähtötilanteeseen
1139     P4=P4_a;
1140
1141     % Kokonaispainumat
1142     S(:, :, simulointi_nro) = -(S_YK+S_NK);
1143
1144     end
1145
1146     S_min1=S(:, :, 1);
1147     S_min2=min(S_min1(:));
1148     sijainti=find(S_min1==S_min2);
1149     S_min_vektori=zeros(simuloinnit_lkm,1);
1150     for i=1:simuloinnit_lkm
1151         S_min=S(:, :, i);
1152         S_min_vektori(i)=S_min(sijainti);
1153     end
1154
1155 end
1156 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1157
1158
1159
1160 % PAINUNEEN PENKEREEN PISTEIDEN ULOSKIRJOITUS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1161 if Noste==0
1162     painunut=P1(:, :, 1)+S(:, :, simulointi_nro);
1163 else
1164     painunut=P1(:, :, 1)+S;
1165 end
1166
1167 x_apu=zeros(P_xlkm,P_ylkm);
1168 for i=1:P_xlkm
1169     x_apu(i, :)=xx(i);
1170 end
1171
1172 y_apu=zeros(P_xlkm,P_ylkm);
1173 for i=1:P_ylkm
1174     y_apu(:, i)=yy(i);
1175 end
1176

```



```

1218 for i=1:P_zlkm
1219     a(i,:)= P11(find(xx==leikkaus_x),:,i);
1220 end
1221 a(1,1)=1;
1222 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1223 contourf(yy,zz,a,'ShowText','on');
1224 hold on
1225 plot (yy,P1(find(xx==leikkaus_x),:,1),'k','linewidth',2);
1226 plot (yy,P2(find(xx==leikkaus_x),:,1),'b','linewidth',2);
1227 plot (yy,P14(find(xx==leikkaus_x),:,1),'y','linewidth',2);
1228 plot (yy,P3(find(xx==leikkaus_x),:,1),'r','linewidth',2);
1229 plot (yy,P4(find(xx==leikkaus_x),:,1),'m','linewidth',2);
1230 plot (yy,P5(find(xx==leikkaus_x),:,1),'c','linewidth',2);
1231 hold off
1232 legend('','Penger','Maanpinta','Kevennyksen yp','Kaivupinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
1233 grid on
1234 title(sprintf('x = %i, Poikkileikkaus, Cr', leikkaus_x));
1235
1236 % Leikkaus y-akselin suunnassa annetulla x, e0
1237 for i=1:P_zlkm
1238     a(i,:)= P10(find(xx==leikkaus_x),:,i);
1239 end
1240 a(1,1)=1;
1241 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1242 contourf(yy,zz,a,'ShowText','on');
1243 hold on
1244 plot (yy,P1(find(xx==leikkaus_x),:,1),'k','linewidth',2);
1245 plot (yy,P2(find(xx==leikkaus_x),:,1),'b','linewidth',2);
1246 plot (yy,P14(find(xx==leikkaus_x),:,1),'y','linewidth',2);
1247 plot (yy,P3(find(xx==leikkaus_x),:,1),'r','linewidth',2);
1248 plot (yy,P4(find(xx==leikkaus_x),:,1),'m','linewidth',2);
1249 plot (yy,P5(find(xx==leikkaus_x),:,1),'c','linewidth',2);
1250 hold off
1251 legend('','Penger','Maanpinta','Kevennyksen yp','Kaivupinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
1252 grid on
1253 title(sprintf('x = %i, Poikkileikkaus, e0', leikkaus_x));
1254
1255 % Leikkaus y-akselin suunnassa annetulla x, jännityslisäykset
1256 a=zeros(P_zlkm,P_ylkm);
1257 for i=1:P_zlkm
1258     a(i,:)= P8(find(xx==leikkaus_x),:,i);

```

```

1259 end
1260 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1261 contourf(yy,zz,a,'ShowText','on');
1262 hold on
1263 plot (yy,P1(find(xx==leikkaus_x),:,1),'k','linewidth',2);
1264 plot (yy,P2(find(xx==leikkaus_x),:,1),'b','linewidth',2);
1265 plot (yy,P14(find(xx==leikkaus_x),:,1),'y','linewidth',2);
1266 plot (yy,P3(find(xx==leikkaus_x),:,1),'r','linewidth',2);
1267 plot (yy,P4(find(xx==leikkaus_x),:,1),'m','Linewidth',2);
1268 plot (yy,P5(find(xx==leikkaus_x),:,1),'c','Linewidth',2);
1269 hold off
1270 legend('','Penger','Maanpinta','Kevennyksen yp','Kaivupinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
1271 grid on
1272 title(sprintf('x = %i, Poikkileikkaus, kuorman aiheuttamat jännityslisäykset [kPa]', leikkaus_x));
1273
1274 % Leikkaus y-akselin suunnassa annetulla x, vallitseva+lisä
1275 a=zeros(P_zlkm,P_ylkm);
1276 for i=1:P_zlkm
1277     a(i,:)= P13(find(xx==leikkaus_x),:,i);
1278 end
1279 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1280 contourf(yy,zz,a,'ShowText','on');
1281 hold on
1282 plot (yy,P1(find(xx==leikkaus_x),:,1),'k','linewidth',2);
1283 plot (yy,P2(find(xx==leikkaus_x),:,1),'b','linewidth',2);
1284 plot (yy,P14(find(xx==leikkaus_x),:,1),'y','linewidth',2);
1285 plot (yy,P3(find(xx==leikkaus_x),:,1),'r','linewidth',2);
1286 plot (yy,P4(find(xx==leikkaus_x),:,1),'m','Linewidth',2);
1287 plot (yy,P5(find(xx==leikkaus_x),:,1),'c','Linewidth',2);
1288 hold off
1289 legend('','Penger','Maanpinta','Kevennyksen yp','Kaivupinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
1290 grid on
1291 title(sprintf('x = %i, Poikkileikkaus, pystyjännitykset vallitseva+lisä [kPa]', leikkaus_x));
1292
1293 % Kuva, poikkileikkaus y-akselin suunnassa annetulla x, muodonmuutos-%, tasa-arvokäyrät
1294 a_epsilon=zeros(P_zlkm,P_ylkm);
1295 epsilon=epsilon_YK+epsilon_NK;
1296 for i=1:P_zlkm
1297     a_epsilon(i,:)= epsilon(find(xx==leikkaus_x),:,i);
1298 end
1299 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])

```

```

1300 contourf(yy,zz,a_epsilon,'ShowText','on');
1301 hold on
1302 plot (yy,P1(find(xx==leikkaus_x),:,1),'k','linewidth',2);
1303 plot (yy,P2(find(xx==leikkaus_x),:,1),'b','linewidth',2);
1304 plot (yy,P14(find(xx==leikkaus_x),:,1),'y','linewidth',2);
1305 plot (yy,P3(find(xx==leikkaus_x),:,1),'r','linewidth',2);
1306 plot (yy,P4(find(xx==leikkaus_x),:,1),'m','Linewidth',2);
1307 plot (yy,P5(find(xx==leikkaus_x),:,1),'c','Linewidth',2);
1308 hold off
1309 legend('','Penger','Maanpinta','Kevennyksen yp','Kaivupinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
1310 grid on
1311 title(sprintf('x = %i, Poikkileikkaus, muodonmuutokset (*100)', leikkaus_x));
1312
1313 % Leikkaus x-akselin suunnassa y:n puolivälistä, jännityslisäykset
1314 lisaykset=zeros(P_zlkm,P_xlkm);
1315 for i=1:P_zlkm
1316     lisaykset(i,:)=P8(:,ceil(P_ylkm/2),i);
1317 end
1318 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1319 contourf(xx,zz,lisaykset,'ShowText','on');
1320 hold on
1321 plot (xx,P1(:,ceil(P_ylkm/2),1),'k','linewidth',2);
1322 plot (xx,P2(:,ceil(P_ylkm/2),1),'b','linewidth',2);
1323 plot (xx,P14(:,ceil(P_ylkm/2),1),'y','Linewidth',2);
1324 plot (xx,P3(:,ceil(P_ylkm/2),1),'r','linewidth',2);
1325 plot (xx,P4(:,ceil(P_ylkm/2),1),'m','Linewidth',2);
1326 plot (xx,P5(:,ceil(P_ylkm/2),1),'c','Linewidth',2);
1327 hold off
1328 legend('','Penger','Maanpinta','Kevennyksen yp','Kaivupinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
1329 grid on
1330 title('Pituusleikkaus, kuorman aiheuttamat jännityslisäykset [kPa]);
1331
1332 % Leikkaus x-akselin suunnassa y:n puolivälistä, vallitseva+lisä
1333 jannitykset=zeros(P_zlkm,P_xlkm);
1334 for i=1:P_zlkm
1335     jannitykset(i,:)=P13(:,ceil(P_ylkm/2),i);
1336 end
1337 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1338 contourf(xx,zz,jannitykset,'ShowText','on');
1339 hold on
1340 plot (xx,P1(:,ceil(P_ylkm/2),1),'k','linewidth',2);

```

```

1341 plot (xx,P2(:,ceil(P_ylkm/2),1),'b','linewidth',2);
1342 plot (xx,P14(:,ceil(P_ylkm/2),1),'y','Linewidth',2);
1343 plot (xx,P3(:,ceil(P_ylkm/2),1),'r','linewidth',2);
1344 plot (xx,P4(:,ceil(P_ylkm/2),1),'m','Linewidth',2);
1345 plot (xx,P5(:,ceil(P_ylkm/2),1),'c','Linewidth',2);
1346 hold off
1347 legend('','Penger','Maanpinta','Kevennyksen yp','Kaivupinta','Kuivakuoren ap','Saven ap','location','southeast');
1348 grid on
1349 title('Pituusleikkaus, pystyjännitykset vallitseva+lisä [kPa]);
1350
1351 % Leikkaus y-akselin suunnassa x:n puolivälistä, painumat
1352 painumat=S(:, :, simulointi_nro);
1353 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1354 plot(yy,painumat(find(xx==leikkaus_x),:));
1355 title(sprintf('x = %i, Poikkileikkaus, painumat [m]', leikkaus_x));
1356
1357 % Leikkaus x-akselin suunnassa y:n puolivälistä, painumat
1358 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1359 plot(xx,painumat(:,ceil(P_ylkm/2)));
1360 title('Pituusleikkaus, painumat [m]);
1361
1362 % Painunen pinnan z-koordinaatit ylhäältäpäin, tasa-arvokäyrät
1363 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1364 contourf(xx,yy,transpose(P1(:, :, 1)+painumat), 'ShowText', 'on');
1365 title('Painunut penger, z-koordinaatit');
1366 axis equal
1367
1368 % Painunut pinta 3D
1369 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1370 surf(xx,yy,transpose(P1(:, :, 1)+painumat));
1371 hold on
1372 a=surf(xx,yy,transpose(P1(:, :, 1)));
1373 hold off
1374 alpha(a,.2);
1375 title('Painunut penger');
1376 axis equal
1377 daspect([5 5 1])
1378
1379 % Painumat ylhäältäpäin, tasa-arvokäyrät
1380 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1381 contourf(xx,yy,transpose(painumat), 'ShowText', 'on')

```



```
1382 title('Painumat [m]');
1383 axis equal
1384
1385 % Painumat 3D
1386 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1387 surf(xx,yy,transpose(painumat));
1388 title('Painumat [m]');
1389 axis equal
1390 daspect([20 20 1])
1391
1392 % Laskennassa käytetyt pinnat 3D
1393 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1394 a=surf(xx,yy,transpose(P1(:,:,1)));
1395 hold on
1396 b=surf(xx,yy,transpose(P2(:,:,1)));
1397 c=surf(xx,yy,transpose(P3(:,:,1)));
1398 d=surf(xx,yy,transpose(P4(:,:,1)));
1399 e=surf(xx,yy,transpose(P5(:,:,1)));
1400 f=surf(xx,yy,transpose(P14(:,:,1)));
1401 hold off
1402 title('Laskenta-alueen pinnat (Laskentapistehilan kohdalla)');
1403 axis equal
1404 daspect([5 5 1])
1405
1406 % Laskennassa käytetty kevennyksen yläpinta 3D
1407 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1408 surf(xx,yy,transpose(P14(:,:,1)));
1409 title('Kevennyksen yläpinta laskenta-alueella');
1410 axis equal
1411 daspect([5 5 1])
1412
1413 % Laskennassa käytetty saven alapinta 3D
1414 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1415 surf(xx,yy,transpose(P5(:,:,1)));
1416 title('Saven alapinta laskenta-alueella');
1417 axis equal
1418 daspect([5 5 1])
1419
1420 % Laskennassa käytetty kuivakuoren alapinta 3D
1421 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1422 surf(xx,yy,transpose(P4(:,:,1)));
```

```
1423 title('Kuivakuoren alapinta laskenta-alueella');
1424 axis equal
1425 daspect([5 5 1])
1426
1427 % Laskennassa käytetty kaivupinta 3D
1428 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1429 al=surf(xx,yy,transpose(P3(:, :, 1)));
1430 alpha(al,0.5);
1431 hold on
1432 a=surf(xx,yy,transpose(P14(:, :, 1)));
1433 hold off
1434 title('Kaivupinta ja kevennyksen yläpinta laskenta-alueella');
1435 axis equal
1436 daspect([5 5 1])
1437
1438 % Laskennassa käytetty maanpinta 3D
1439 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1440 surf(xx,yy,transpose(P2(:, :, 1)));
1441 title('Maanpinta laskenta-alueella');
1442 axis equal
1443 daspect([5 5 1])
1444
1445 % Laskennassa käytetty penkereen yläpinta 3D
1446 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1447 surf(xx,yy,transpose(P1(:, :, 1)));
1448 title('Penkereen yläpinta laskentapisteen alueella');
1449 axis equal
1450 daspect([5 5 1])
1451
1452 % Kuormien laskennassa käytetty pengeri
1453 for x=1:size(xxQ,2)
1454     for y=1:size(yyQ,2)
1455         if Q1(x,y)==9999
1456             Q1(x,y)=Qz(x,y);
1457         end
1458     end
1459 end
1460 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1461 surf(xxQ,yyQ,transpose(Q1));
1462 title('Kuormien laskentaan käytetty pengeri');
1463 axis equal
```

```
1464 daspect([5 5 1])
1465
1466 % Jakaumien histogrammit Monte Carlo simuloinnissa
1467 if simuloinnit_lkm>1
1468     figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1469     histogram(Cc_kk_vektori)
1470     title('Laskennan Cc kk -jakauma')
1471
1472     figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1473     histogram(Cc_1_vektori)
1474     title('Laskennan Cc 1 -jakauma')
1475
1476     figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1477     histogram(Cc_2_vektori)
1478     title('Laskennan Cc 2 -jakauma')
1479
1480     figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1481     histogram(Cc_3_vektori)
1482     title('Laskennan Cc 3 -jakauma')
1483
1484     figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1485     histogram(Cc_4_vektori)
1486     title('Laskennan Cc 4 -jakauma')
1487
1488     figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1489     histogram(Cc_5_vektori)
1490     title('Laskennan Cc 5 -jakauma')
1491
1492     figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1493     histogram(POP_vektori)
1494     title('Laskennan POP -jakauma')
1495
1496     figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
1497     histogram(kk_vektori)
1498     title('Laskennan kk-virheen jakauma')
1499
1500     keskiarvo=[mean(S_min_vektori) mean(S_min_vektori)];
1501     alle=[prctile(S_min_vektori,5) prctile(S_min_vektori,5)];
1502     yli=[prctile(S_min_vektori,95) prctile(S_min_vektori,95)];
1503     apu=[0 simuloinnit_lkm/2];
1504     figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
```

[illegible]

```

1 % FUNKTIO Boussinesq.m %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % Jännityslisäysten laskenta Boussinesqin pistekuorman teorialla
3 % superpositioperiaatteella
4 % ÄLÄ MUUTA, ELLET OLE VARMA MITÄ TEET
5
6 function y = Boussinesq(Q_xlkm,Q_ylkm,xxQ,yyQ,xx,yy,zz,Qz,Qq,P1)
7
8     Qx=zeros(Q_xlkm,Q_ylkm);
9     Qy=zeros(Q_xlkm,Q_ylkm);
10    for i=1:Q_ylkm
11        Qx(:,i)=xxQ;
12    end
13    for i=1:Q_xlkm
14        Qy(i,:)=yyQ;
15    end
16
17    P=zeros(size(xx,2),size(yy,2),size(zz,2));
18    for x=1:size(xx,2)
19        x1=xx(x);
20        for y=1:size(yy,2)
21            y1=yy(y);
22            %if P1(x,y,1)<9999 % Laskennan nopeutus siten, ettei lasketa jännityslisäyksiä/painumia
23                % penkereen ulkopuolelta. Jos halutaan laskea painumia myös
24                % penkereen ulkopuolelta, %-merkki tämän if-lauseen eteen sekä
25                % end:n eteen riville 47.
26            for z=1:size(zz,2)
27                z1=zz(z);
28                X=Qx-x1;
29                Y=Qy-y1;
30                X2=X.^2;
31                Y2=Y.^2;
32                R2=X2+Y2;
33                Z=Qz-z1;
34                Z(Z<0)=9999;
35                Z(Z<1)=1;
36                Z2=Z.^2;
37                Z3=Z.*Z.*Z;
38                L=sqrt(R2+Z2);
39                L5=L.*L.*L.*L.*L;
40                kerroin1=3*Qq/(2*pi);
41                kerroin2=Z3./L5;

```

[illegible]

```

1 % FUNKTIO POP_Boussinesq.m %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Liite 1 (41/47)
2 % Kaivun aiheuttamien jännitysten muutosten laskenta
3 % ÄLÄ MUUTA, ELLET OLE VARMA MITÄ TEET
4
5 function y = POP_Boussinesq(POP_xlkm,POP_ylkm,xxPOP,yyPOP,xx,yy,zz,POPz,POPq,P1)
6
7     POPx=zeros(POP_xlkm,POP_ylkm);
8     POPy=zeros(POP_xlkm,POP_ylkm);
9     for i=1:POP_ylkm
10         POPx(:,i)=xxPOP;
11     end
12     for i=1:POP_xlkm
13         POPy(i,:)=yyPOP;
14     end
15
16     P=zeros(size(xx,2),size(yy,2),size(zz,2));
17     for x=1:size(xx,2)
18         x1=xx(x);
19         for y=1:size(yy,2)
20             y1=yy(y);
21             %if P1(x,y,1)<9999          % Laskennan nopeutus siten, ettei lasketa jännitysliäsyksiä/painumia penkereen
22                                     % ulkopuolelta. Jos halutaan laskea painumat myös penkereen ulkopuolelta,
23                                     % %-merkki tämän if-lauseen eteen sekä end:n eteen riville 45.
24             for z=1:size(zz,2)
25                 z1=zz(z);
26                 X=POPx-x1;
27                 Y=POPy-y1;
28                 X2=X.^2;
29                 Y2=Y.^2;
30                 R2=X2+Y2;
31                 Z=POPz-z1;
32                 Z(Z<0)=9999;
33                 Z(Z<1)=1;
34                 Z2=Z.^2;
35                 Z3=Z.*Z.*Z;
36                 L=sqrt(R2+Z2);
37                 L5=L.*L.*L.*L.*L;
38                 kerroin1=3*POPq/(2*pi);
39                 kerroin2=Z3./L5;
40                 dsig=kerroin1.*kerroin2;
41                 ind=find(Z==9999);

```

52


```

1 % FUNKTIO Cc.m %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % Cc:n asetus Cc-matriisiin P9 alkioille
3 % Kaivupinnan yläpuolisten ja saven alapuolisten pisteiden nollaus tehdään
4 % pääkoodissa
5 function [y, Cc_kk, Cc_1, Cc_2, Cc_3, Cc_4, Cc_5] = Cc(P4,P9,P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm,zz,kk_virhe)
6
7     Cc_kk= 0.1 ;           % Kuivakuoren Cc
8
9     kerrosraja_1= 1 ; % Kerrosrajan pystysuuntainen etäisyys kuivakuoren alapinnasta
10    Cc_1= 0.88 ;           % Cc ko. kerroksessa
11
12    kerrosraja_2= 2 ;
13    Cc_2= 0.98 ;
14
15    kerrosraja_3= 3 ;
16    Cc_3= 1.31 ;
17
18    kerrosraja_4= 4 ;
19    Cc_4= 1.41 ;
20
21    Cc_5= 0.78 ;           % Cc alimman kerrosrajan alapuolella
22
23
24    % TÄSTÄ ETEENPÄIN ÄLÄ MUUTA, ELLET OLE VARMA MITÄ TEET
25    P_z_arvot=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm);
26    for i=1:P_zlkm
27        P_z_arvot(:, :, i)=zz(i);
28    end
29
30    kerrosraja_1=kerrosraja_1+kk_virhe;
31    kerrosraja_2=kerrosraja_2+kk_virhe;
32    kerrosraja_3=kerrosraja_3+kk_virhe;
33    kerrosraja_4=kerrosraja_4+kk_virhe;
34
35    kk_ero=P_z_arvot-P4;           % Pisteiden z-kordinaattien ja kk:n alapinnan erotus
36
37    ind=find(kk_ero>=0.01);         % Pisteet, joilla erotus on positiivinen
38    P9(ind)=Cc_kk;
39
40    ind=find(-kerrosraja_1<=kk_ero & kk_ero<0.01); % Pisteet rajan 1 ja kk:n välissä
41    P9(ind)=Cc_1;

```

```
43 ind=find(-kerrosraja_2<=kk_ero & kk_ero<-kerrosraja_1); % Pisteet rajan 1 ja 2 välissä
```

44 P9(ind)=Cc_2;

45

```
46 ind=find(-kerrosraja_3<=kk_ero & kk_ero<-kerrosraja_2); % Pisteet rajan 2 ja 3 välissä
```

```
47      P9(ind)=Cc_3;
```

48

```
49 ind=find(-kerrosraja_4<=kk_ero & kk_ero<-kerrosraja_3); % Pisteet rajan 3 ja 4 välissä
```

```
50      P9(ind)=Cc_4;
```

51

```
52 ind=find(kk_ero<-kerrosraja_4); % Pisteet rajan 4 alapuolella
```

53 P9(ind)=Cc_5;

54

```
55      y=P9;
```

56

```
57 % FUNKTIO Cc.m %%%%%%%%%%
```

[illegible]

[illegible]

[illegible]

```

1 % FUNKTIO Cc_Monte_Carlo.m %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % Cc:n asetus Cc-matriisiin P9 alkioille Monte Carlo -simuloinnissa.
3 % Oletuksena log-normaalijakaumat
4
5 function [y, Cc_kk, Cc_1, Cc_2, Cc_3, Cc_4, Cc_5]= Cc_Monte_Carlo(P4,P9,P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm,zz,kk_virhe)
6
7     COV = 0.4 ;           % Variaatiokerroin
8
9     m_kk= 0.1 ;           % Kuivakuoren Cc, keskiarvo
10
11     kerrosraja_1= 1 ;     % Kerroksen alarajan pystysuuntainen etäisyys kuivakuoren alapinnasta
12     m_1= 0.88 ;           % kerroksen Cc, keskiarvo
13
14     kerrosraja_2= 2 ;
15     m_2= 0.98 ;           % kerroksen Cc, keskiarvo
16
17     kerrosraja_3= 3 ;
18     m_3= 1.31 ;           % kerroksen Cc, keskiarvo
19
20     kerrosraja_4= 4 ;
21     m_4= 1.41 ;           % kerroksen Cc, keskiarvo
22
23
24     m_5= 0.78 ;           % alimman kerroksen Cc, keskiarvo
25
26
27     % TÄSTÄ ETEENPÄIN ÄLÄ MUUTA, ELLET OLE VARMA MITÄ TEET
28     v_kk = (COV*m_kk)^2;           % Kuivakuoren Cc, varianssi
29     mu_kk = log((m_kk^2)/sqrt(v_kk+m_kk^2)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
30     sigma_kk = sqrt(log(v_kk/(m_kk^2)+1)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
31     Cc_kk = lognrnd(mu_kk,sigma_kk); % Satunnainen arvo ko. jakaumasta
32
33     v_1 = (COV*m_1)^2;           % kerroksen 1 Cc, varianssi
34     mu_1 = log((m_1^2)/sqrt(v_1+m_1^2)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
35     sigma_1 = sqrt(log(v_1/(m_1^2)+1)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
36     Cc_1 = lognrnd(mu_1,sigma_1); % Satunnainen arvo ko. jakaumasta
37
38     v_2 = (COV*m_2)^2;           % kerroksen 2 Cc, varianssi
39     mu_2 = log((m_2^2)/sqrt(v_2+m_2^2)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
40     sigma_2 = sqrt(log(v_2/(m_2^2)+1)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
41     Cc_2 = lognrnd(mu_2,sigma_2); % Satunnainen arvo ko. jakaumasta

```

```

42
43 v_3 = (COV*m_3)^2; % kerroksen 3 Cc, varianssi
44 mu_3 = log((m_3^2)/sqrt(v_3+m_3^2)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
45 sigma_3 = sqrt(log(v_3/(m_3^2)+1)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
46 Cc_3 = lognrnd(mu_3,sigma_3); % Satunnainen arvo ko. jakaumasta
47
48 v_4 = (COV*m_4)^2; % kerroksen 4 Cc, varianssi
49 mu_4 = log((m_4^2)/sqrt(v_4+m_4^2)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
50 sigma_4 = sqrt(log(v_4/(m_4^2)+1)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
51 Cc_4 = lognrnd(mu_4,sigma_4); % Satunnainen arvo ko. jakaumasta
52
53 v_5 = (COV*m_5)^2; % alimman kerroksen Cc, varianssi
54 mu_5 = log((m_5^2)/sqrt(v_5+m_5^2)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
55 sigma_5 = sqrt(log(v_5/(m_5^2)+1)); % Lognormaalijakauman tunnusluvut
56 Cc_5 = lognrnd(mu_5,sigma_5); % Satunnainen arvo ko. jakaumasta
57
58 P_z_arvot=zeros(P_xlkm,P_ylkm,P_zlkm);
59 for i=1:P_zlkm
60     P_z_arvot(:,:,i)=zz(i);
61 end
62
63 kerrosraja_1=kerrosraja_1+kk_virhe;
64 kerrosraja_2=kerrosraja_2+kk_virhe;
65 kerrosraja_3=kerrosraja_3+kk_virhe;
66 kerrosraja_4=kerrosraja_4+kk_virhe;
67
68 kk_ero=P_z_arvot-P4; % Pisteiden z-kordinaattien ja kk:n alapinnan erotus
69
70 ind=find(kk_ero>=0.01); % Pisteet, joilla erotus on positiivinen
71 P9(ind)=Cc_kk;
72
73 ind=find(-kerrosraja_1<=kk_ero & kk_ero<0.01); % Pisteet rajan 1 ja kk:n välissä
74 P9(ind)=Cc_1;
75
76 ind=find(-kerrosraja_2<=kk_ero & kk_ero<-kerrosraja_1); % Pisteet rajan 1 ja 2 välissä
77 P9(ind)=Cc_2;
78
79 ind=find(-kerrosraja_3<=kk_ero & kk_ero<-kerrosraja_2); % Pisteet rajan 2 ja 3 välissä
80 P9(ind)=Cc_3;
81
82 ind=find(-kerrosraja_4<=kk_ero & kk_ero<-kerrosraja_3); % Pisteet rajan 3 ja 4 välissä

```

[illegible]

[illegible]

```

1 % FUNKTIO kk_Monte_Carlo.m %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % Kuivakuoren alapinnan tason virhetermin lisäys Monte Carlo -simuloinnissa. Oletuksena
3 % virhetermille on kolmiojakauma.
4
5 function y = kk_Monte_Carlo(P4)
6
7     alaraja = -0.5;      % Kolmiojakauman alaraja
8     huippu = 0;          % Kolmiojakauman huippu
9     ylaraja = 0.5;       % Kolmiojakauman yläraja
10
11
12     % TÄSTÄ ETEENPÄIN ÄLÄ MUUTA, ELLET OLE VARMA MITÄ TEET
13     pd = makedist('Triangular','a',alaraja,'b',huippu,'c',ylaraja);
14     kk_virhe = random(pd);
15
16     y=kk_virhe;
17 % FUNKTIO POP.m %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Liite 3. Laskentamoottorin validoinnissa käytettyjen pintatiedostojen sisältö

TESTILASKENTA 1:

penkka.txt

0 10 0 48 12 1 2 12 1
0 10 0 50 10 0 48 12 1
50 10 0 48 12 1 48 18 1
50 10 0 50 20 0 48 18 1
50 20 0 48 18 1 2 18 1
0 20 0 2 18 1 50 20 0
0 10 0 2 12 1 0 20 0
0 20 0 2 18 1 2 12 1
2 12 1 48 12 1 48 18 1
2 12 1 2 18 1 48 18 1

maa.txt

-10 0 0 60 0 0 60 30 0
-10 0 0 -10 30 0 60 30 0

kaivu.txt

-999 -999 -999 -999 -999 -999 -999 -999 -999

kuivakuori.txt

-10 0 -2 60 0 -2 60 30 -2
-10 0 -2 -10 30 -2 60 30 -2

savi.txt

-10 0 -6 60 0 -6 60 30 -6
-10 0 -6 -10 30 -6 60 30 -6

kevennys.txt

-999 -999 -999 -999 -999 -999 -999 -999 -999

TESTILASKENTA 2:**penkka.txt**

0 10 0 48 12 1 2 12 1
0 10 0 50 10 0 48 12 1
50 10 0 48 12 1 48 18 1
50 10 0 50 20 0 48 18 1
50 20 0 48 18 1 2 18 1
0 20 0 2 18 1 50 20 0
0 10 0 2 12 1 0 20 0
0 20 0 2 18 1 2 12 1
2 12 1 48 12 1 48 18 1
2 12 1 2 18 1 48 18 1

maa.txt

-10 0 0 60 0 0 60 30 0
-10 0 0 -10 30 0 60 30 0

kaivu.txt

0 10 0 48 12 -1 2 12 -1
0 10 0 50 10 0 48 12 -1
50 10 0 48 12 -1 48 18 -1
50 10 0 50 20 0 48 18 -1
50 20 0 48 18 -1 2 18 -1
0 20 0 2 18 -1 50 20 0
0 10 0 2 12 -1 0 20 0
0 20 0 2 18 -1 2 12 -1
2 12 -1 48 12 -1 48 18 -1
2 12 -1 2 18 -1 48 18 -1

kuivakuori.txt

-10 0 -2 60 0 -2 60 30 -2
-10 0 -2 -10 30 -2 60 30 -2

savi.txt

-10 0 -6 60 0 -6 60 30 -6
-10 0 -6 -10 30 -6 60 30 -6

kevennys.txt

-999 -999 -999 -999 -999 -999 -999 -999 -999

TESTILASKENTA 3:**penkka.txt**

0 6.875 0.6875 0 11.5 3 50 6.875 0.6875
 0 11.5 3 50 11.5 3 50 6.875 0.6875
 0 11.5 3 0 17.5 3 50 11.5 3
 0 17.5 3 50 17.5 3 50 11.5 3
 0 17.5 3 0 19.5833 1.9583 50 17.5 3
 0 19.5833 1.9583 50 19.5833 1.9583 50 17.5 3

maa.txt, oja osana maanpintaa

0 0 0 0 13 1.3 50 0 0
 0 13 1.3 50 13 1.3 50 0 0
 0 13 1.3 50 13 1.3 0 14 0.4
 0 14 0.4 50 14 0.4 50 13 1.3
 0 14 0.4 0 15 0.4 50 14 0.4
 0 15 0.4 50 15 0.4 50 14 0.4
 0 15 0.4 0 16 1.6 50 15 0.4
 0 16 1.6 50 16 1.6 50 15 0.4
 0 16 1.6 0 30 3 50 16 1.6
 0 30 3 50 30 3 50 16 1.6

maa.txt, oja mallinnettu kaivuna

0 0 0 50 0 0 50 30 3
 0 0 0 50 30 3 0 30 3

kaivu.txt, oja osana maanpintaa

-999 -999 -999 -999 -999 -999 -999 -999

kaivu.txt, oja mallinnettu kaivuna

0 0 0 0 13 1.3 50 0 0
 0 13 1.3 50 13 1.3 50 0 0
 0 13 1.3 50 13 1.3 0 14 0.4
 0 14 0.4 50 14 0.4 50 13 1.3
 0 14 0.4 0 15 0.4 50 14 0.4
 0 15 0.4 50 15 0.4 50 14 0.4
 0 15 0.4 0 16 1.6 50 15 0.4
 0 16 1.6 50 16 1.6 50 15 0.4
 0 16 1.6 0 30 3 50 16 1.6
 0 30 3 50 30 3 50 16 1.6

kuivakuori.txt

0 0 -2 0 30 2 50 0 -2
 0 30 2 50 30 2 50 0 -2

savi.txt

0 0 -4 0 30 -8 50 0 -4
 0 30 -8 50 30 -8 50 0 -4

kevennys.txt

0 0 0 0 13 1.3 50 0 0

0 13 1.3 50 13 1.3 50 0 0
 0 13 1.3 50 13 1.3 0 14 0.4
 0 14 0.4 50 14 0.4 50 13 1.3
 0 14 0.4 0 15 0.4 50 14 0.4
 0 15 0.4 50 15 0.4 50 14 0.4
 0 15 0.4 0 16 1.6 50 15 0.4
 0 16 1.6 50 16 1.6 50 15 0.4
 0 16 1.6 0 30 3 50 16 1.6
 0 30 3 50 30 3 50 16 1.6

TESTILASKENTA 4:**penkka.txt**

0 10 0 48 12 1 2 12 1
0 10 0 50 10 0 48 12 1
50 10 0 48 12 1 48 18 1
50 10 0 50 20 0 48 18 1
50 20 0 48 18 1 2 18 1
0 20 0 2 18 1 50 20 0
0 10 0 2 12 1 0 20 0
0 20 0 2 18 1 2 12 1
2 12 1 48 12 1 48 18 1
2 12 1 2 18 1 48 18 1

maa.txt

-10 0 0 60 0 0 60 30 0
-10 0 0 -10 30 0 60 30 0

kaivu.txt

0 10 0 48 12 -1 2 12 -1
0 10 0 50 10 0 48 12 -1
50 10 0 48 12 -1 48 18 -1
50 10 0 50 20 0 48 18 -1
50 20 0 48 18 -1 2 18 -1
0 20 0 2 18 -1 50 20 0
0 10 0 2 12 -1 0 20 0
0 20 0 2 18 -1 2 12 -1
2 12 -1 48 12 -1 48 18 -1
2 12 -1 2 18 -1 48 18 -1

kuivakuori.txt

-10 0 -2 60 0 -2 60 30 -2
-10 0 -2 -10 30 -2 60 30 -2

savi.txt

-10 0 -6 60 0 -6 60 30 -6
-10 0 -6 -10 30 -6 60 30 -6

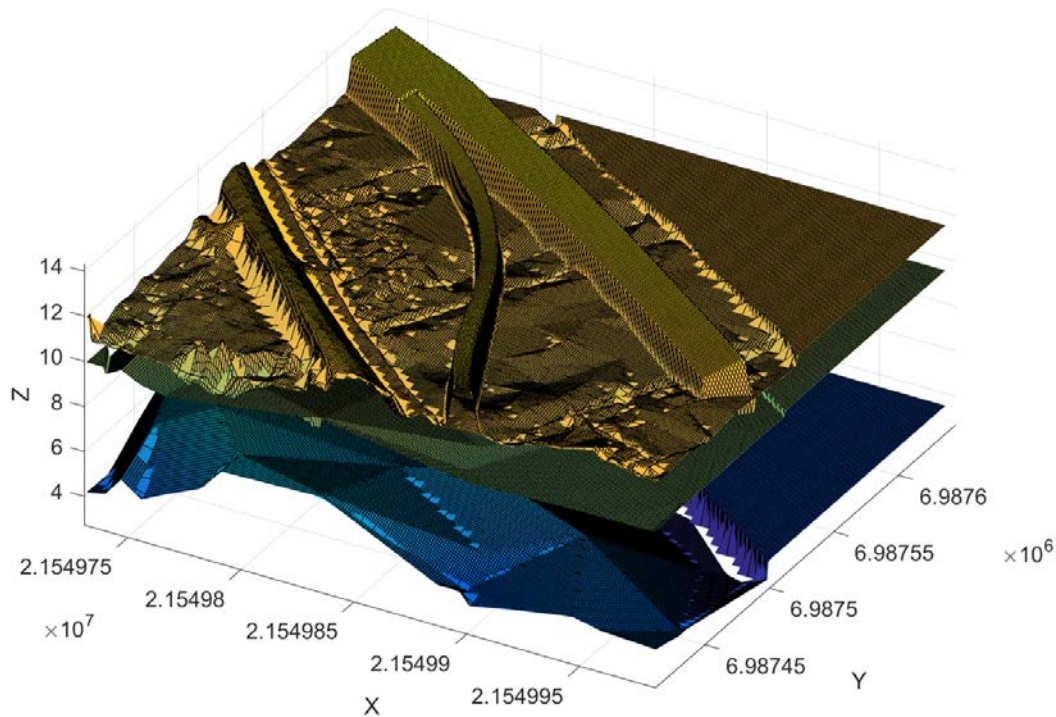
kevennys.txt

2 12 -1 50 10 0 50 20 0
2 18 -1 50 20 0 2 12 -1

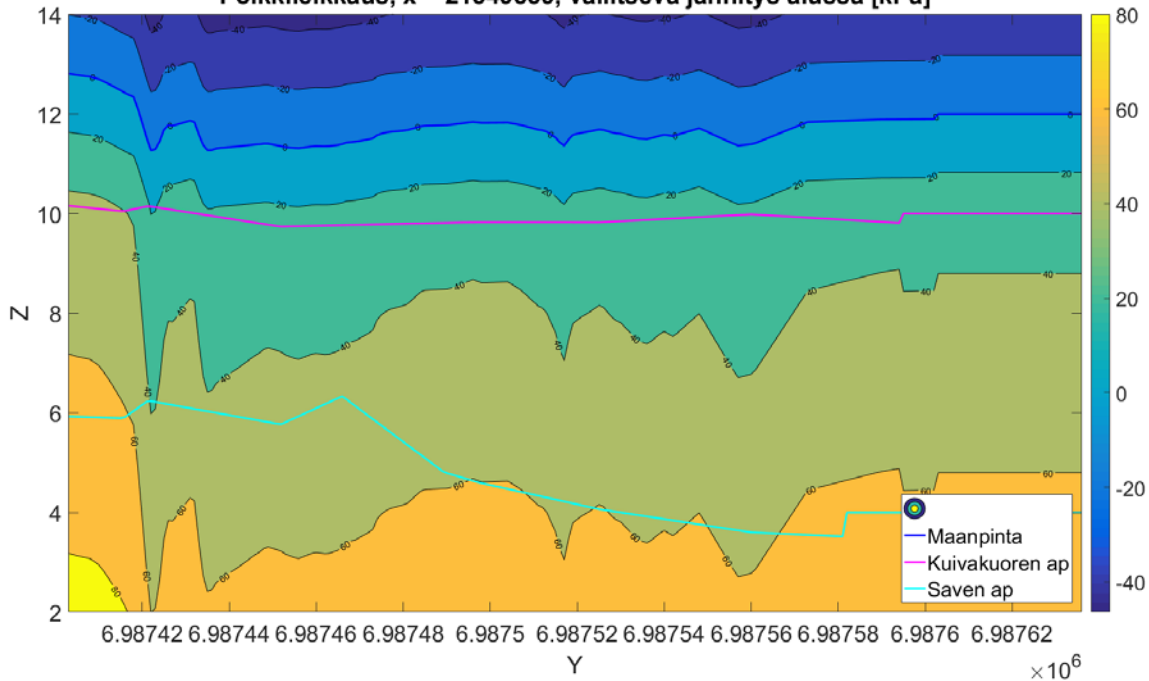
Liite 4. Deterministisen koelaskennan laskentatulosteet

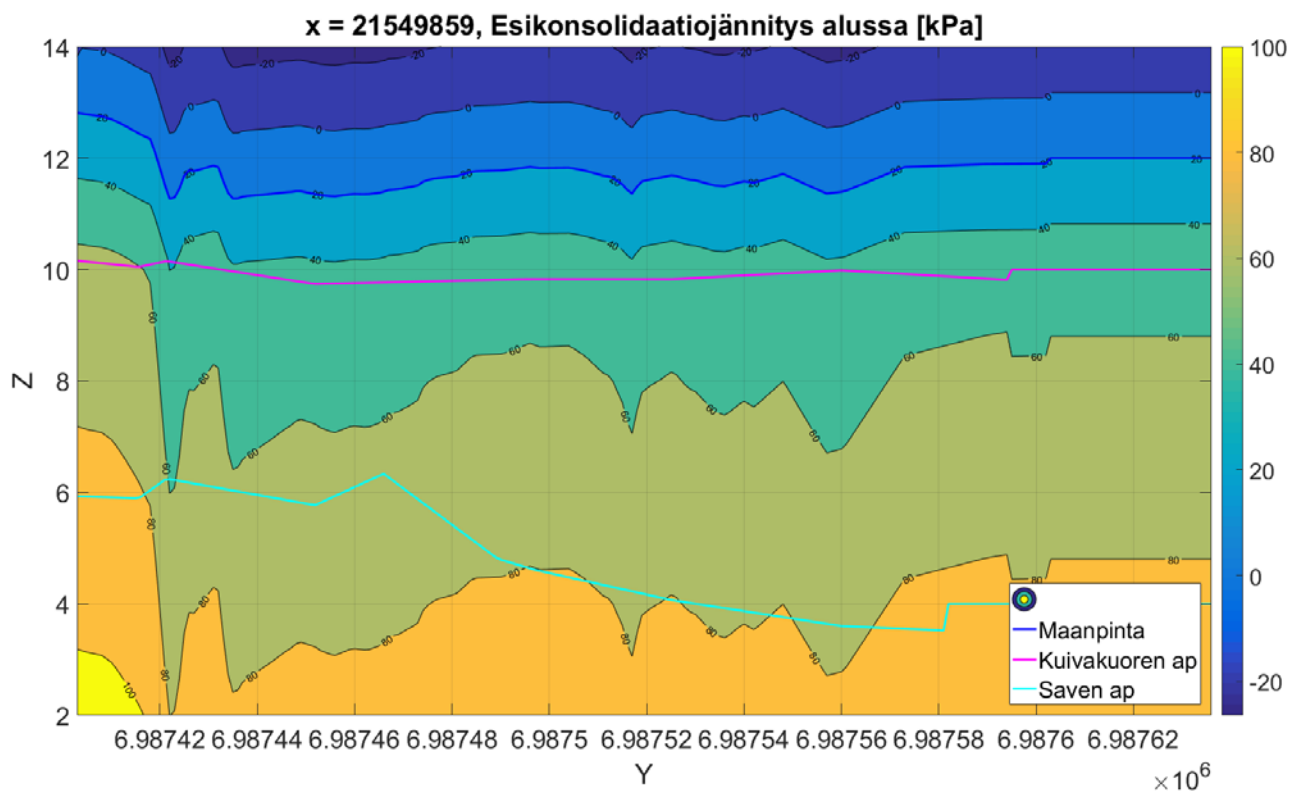
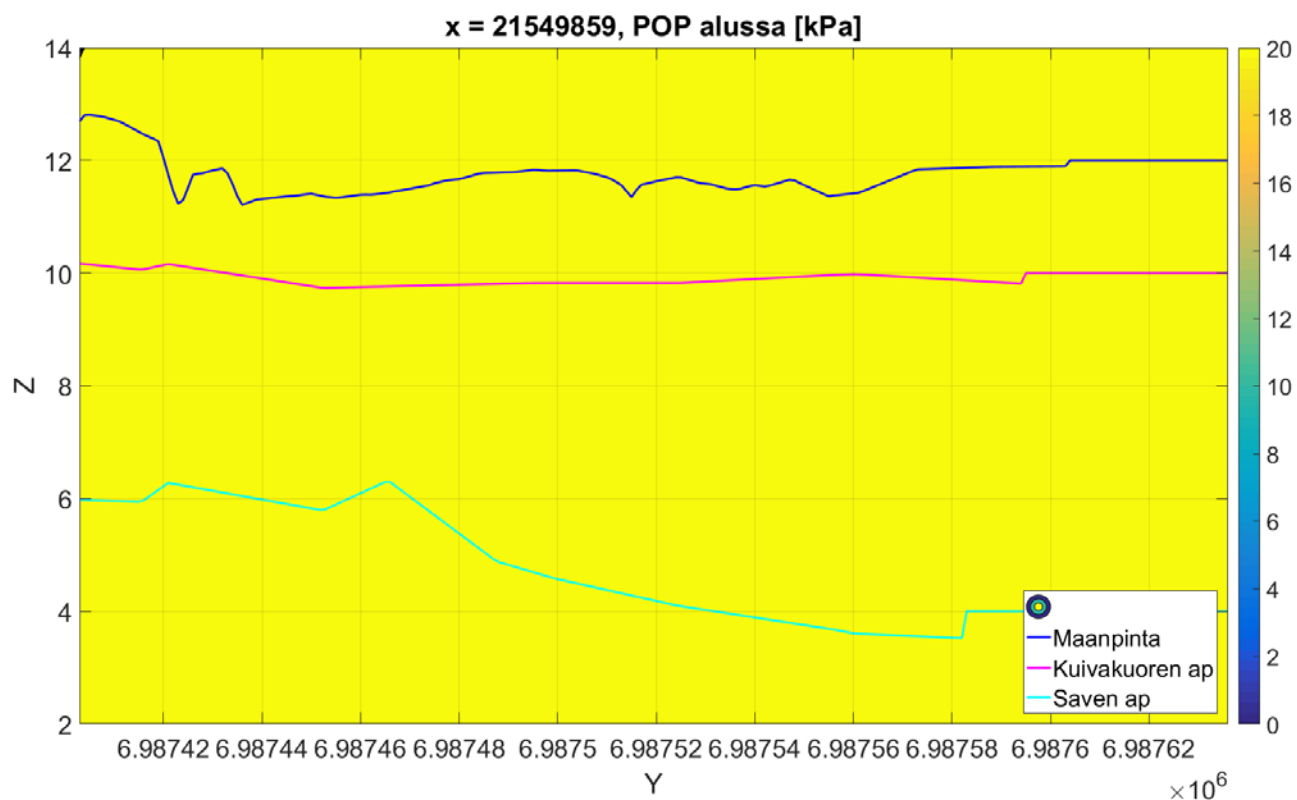
Huom. Kaikkia kuvia on MATLAB:ssa mahdollista pyörittää, zoomata, tarkastaa yksittäisiä arvoja ym. Poikki- ja pituusleikkauskuvia on myös mahdollista tulostaa mistä tahansa kohdasta. Tulostukseen tulevat tiedot kerätään laskentaan tallentuneista laskentapiste-, kuorma- ja painumamatriiseista.

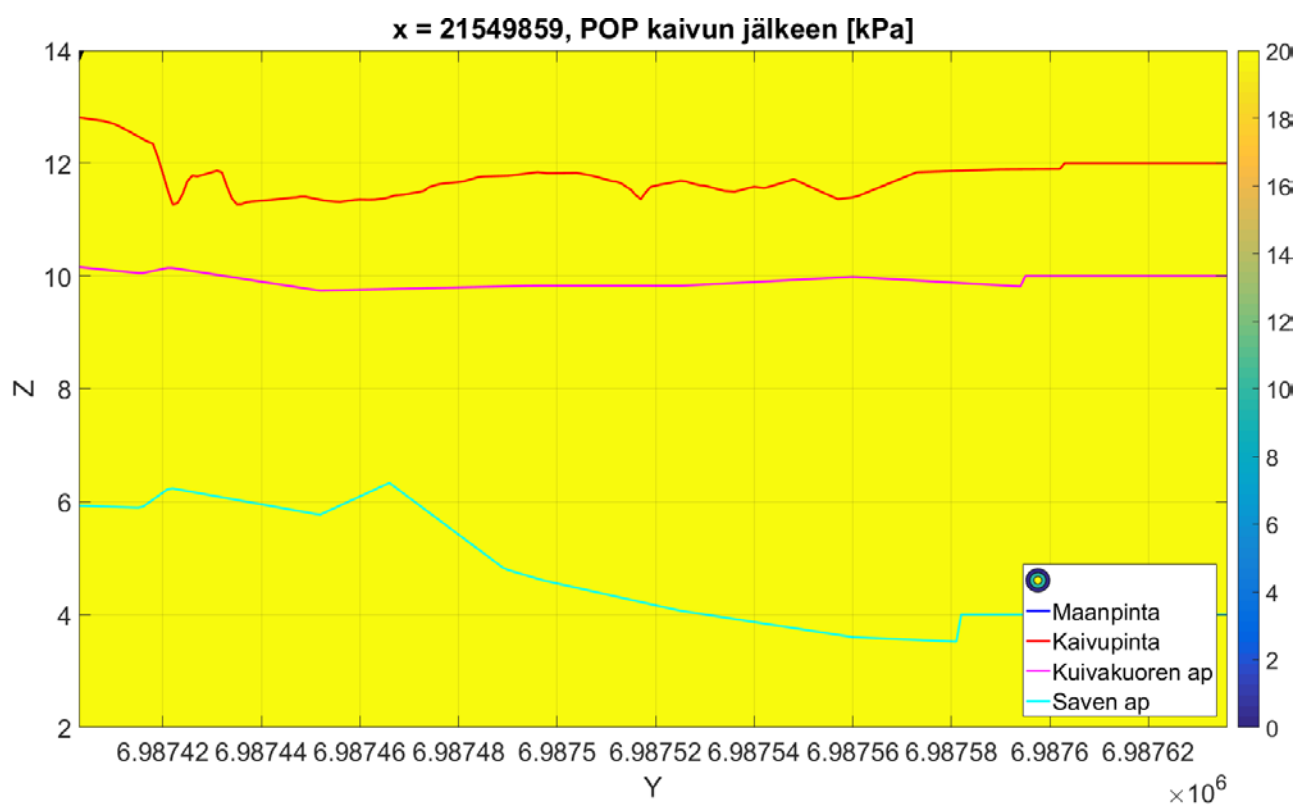
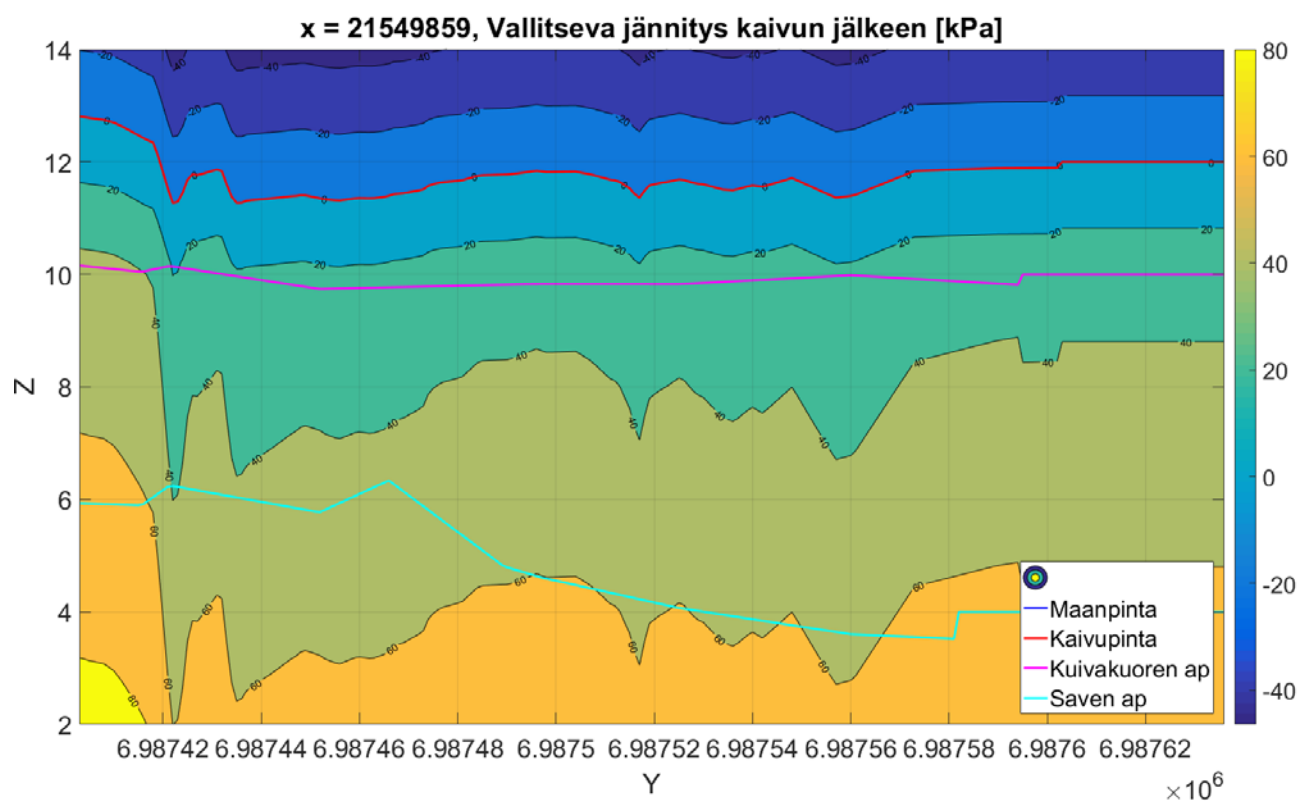
Jännityslisäysten laskennassa käytetty penger, alueen pinnat ja laskentapisteiden alue

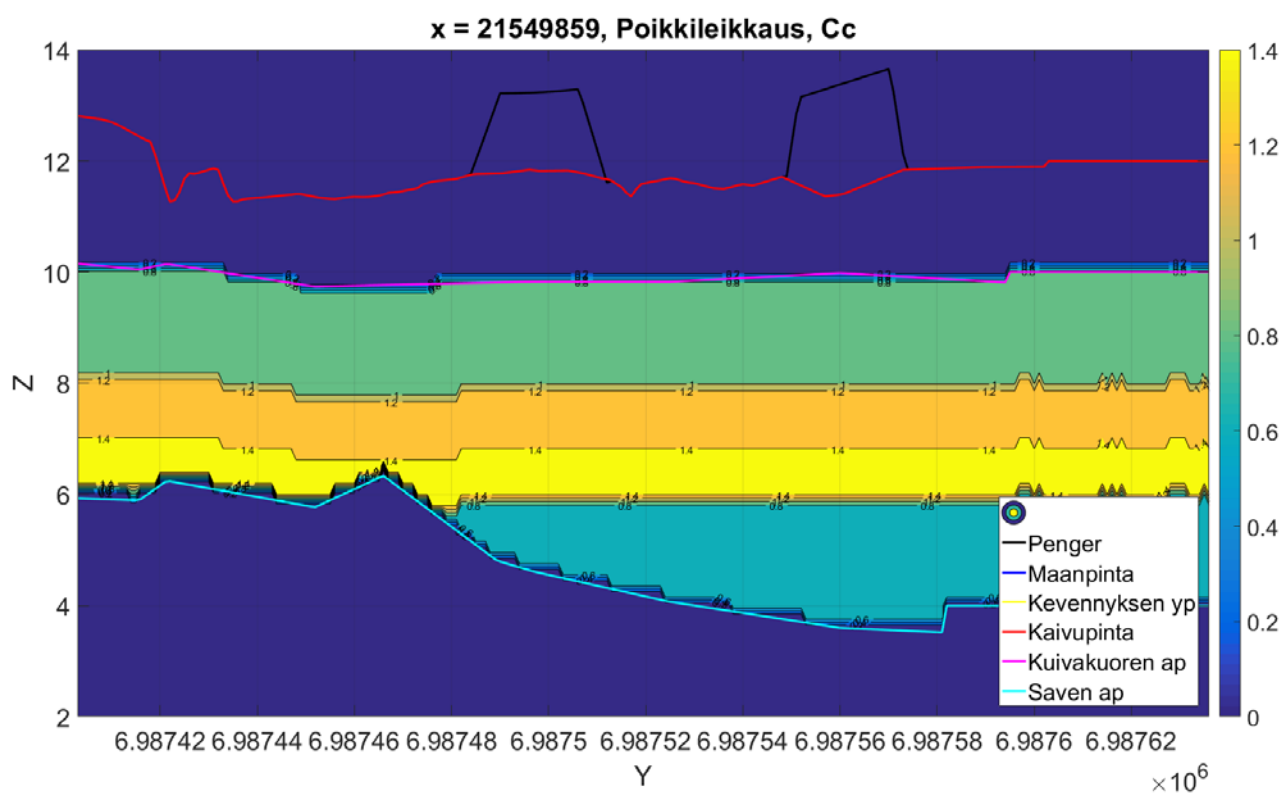
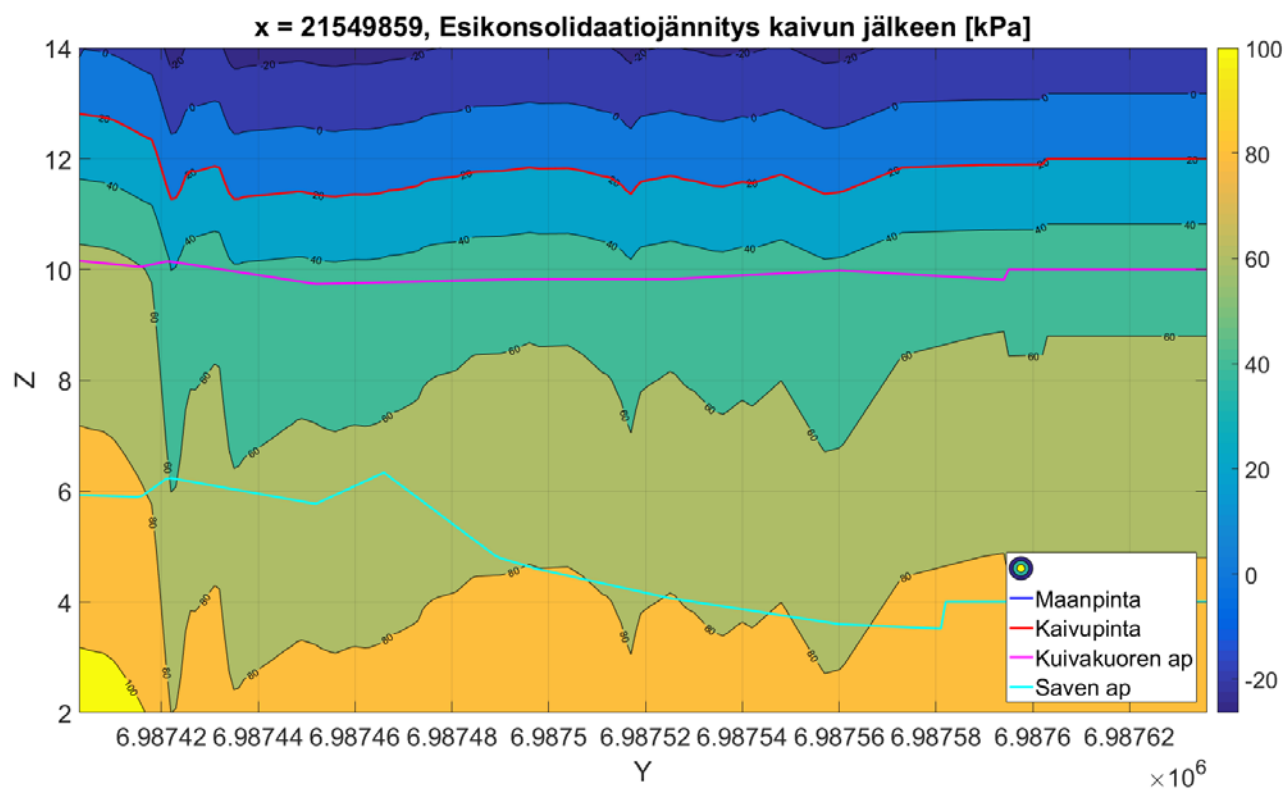


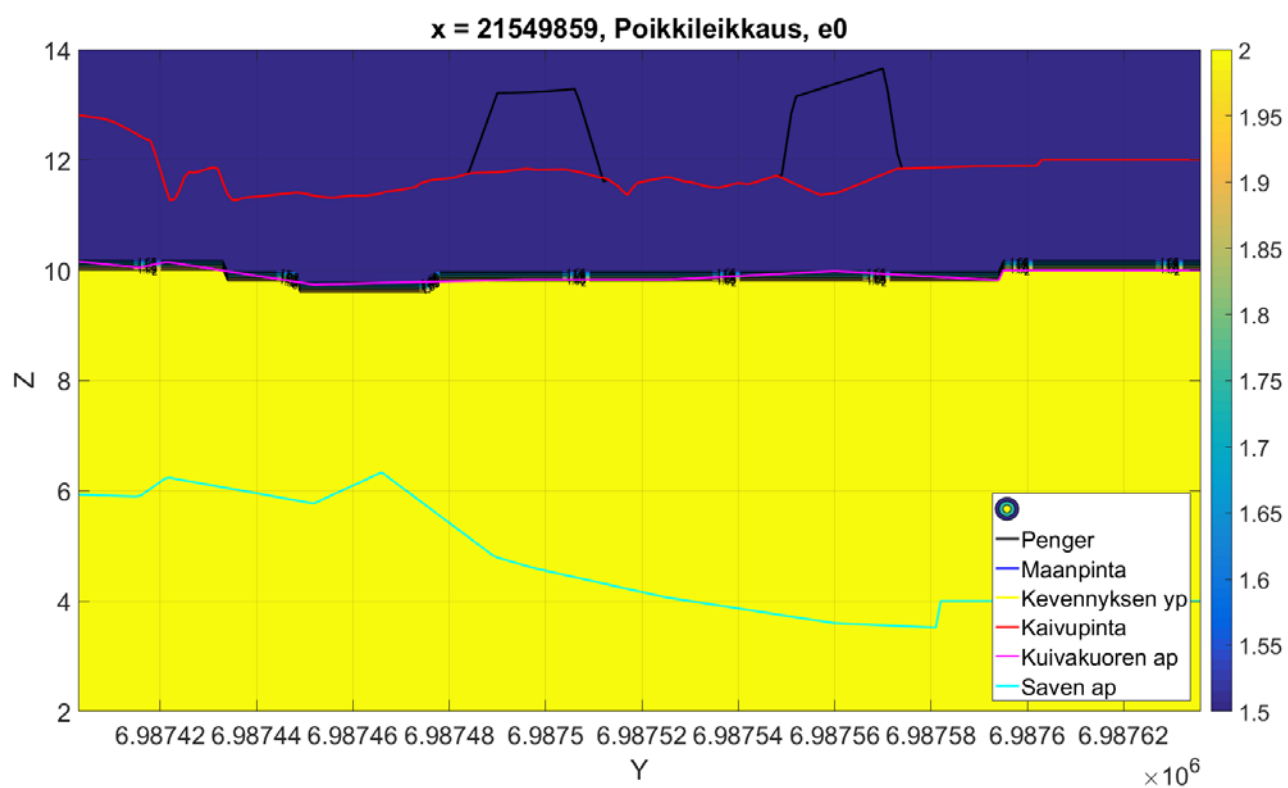
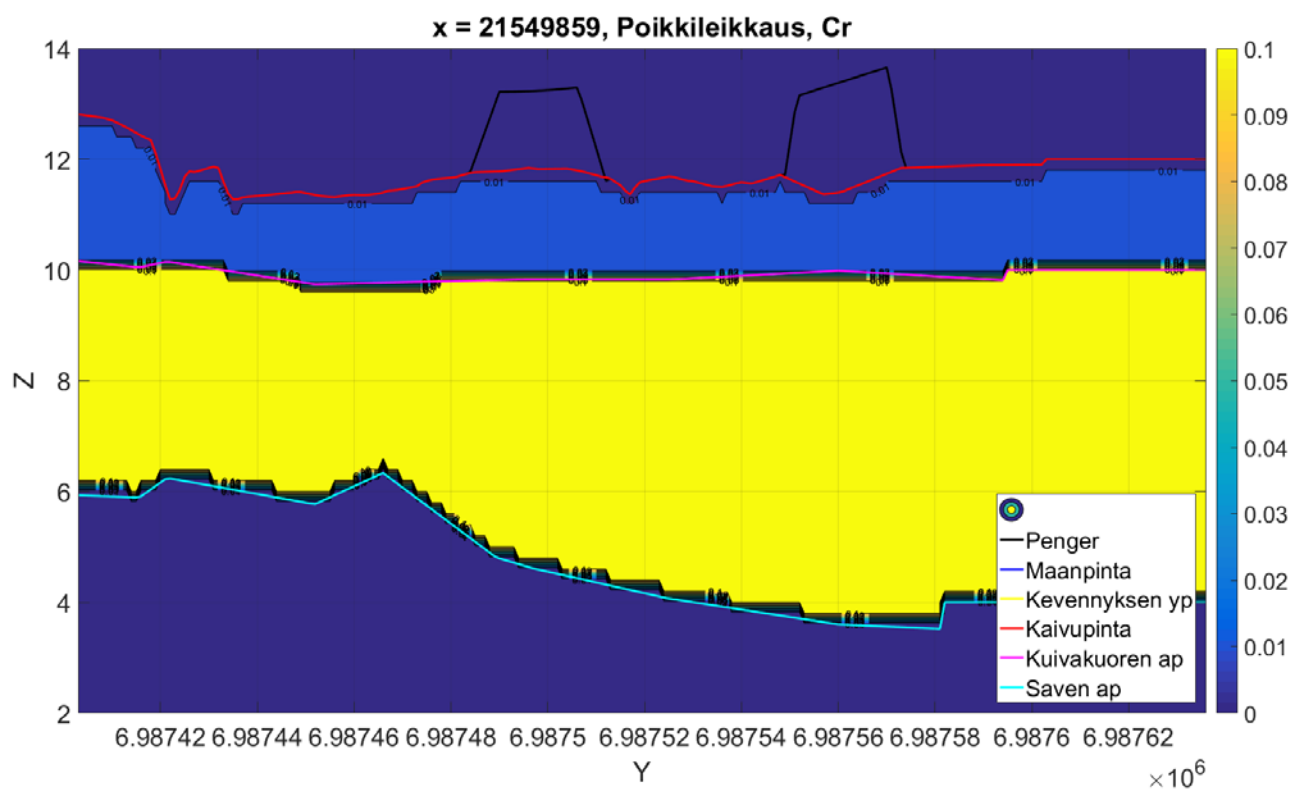
Poikkileikkaus, x = 21549859, vallitseva jännitys alussa [kPa]

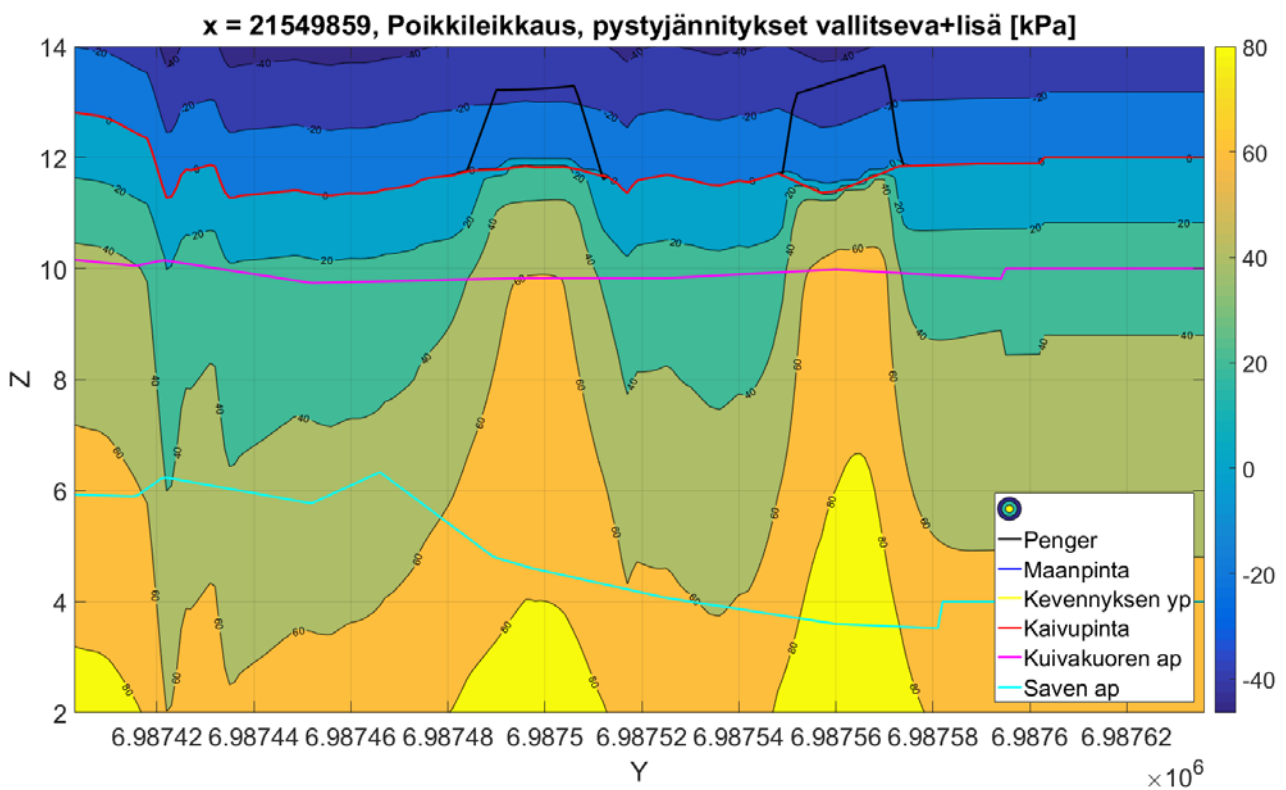
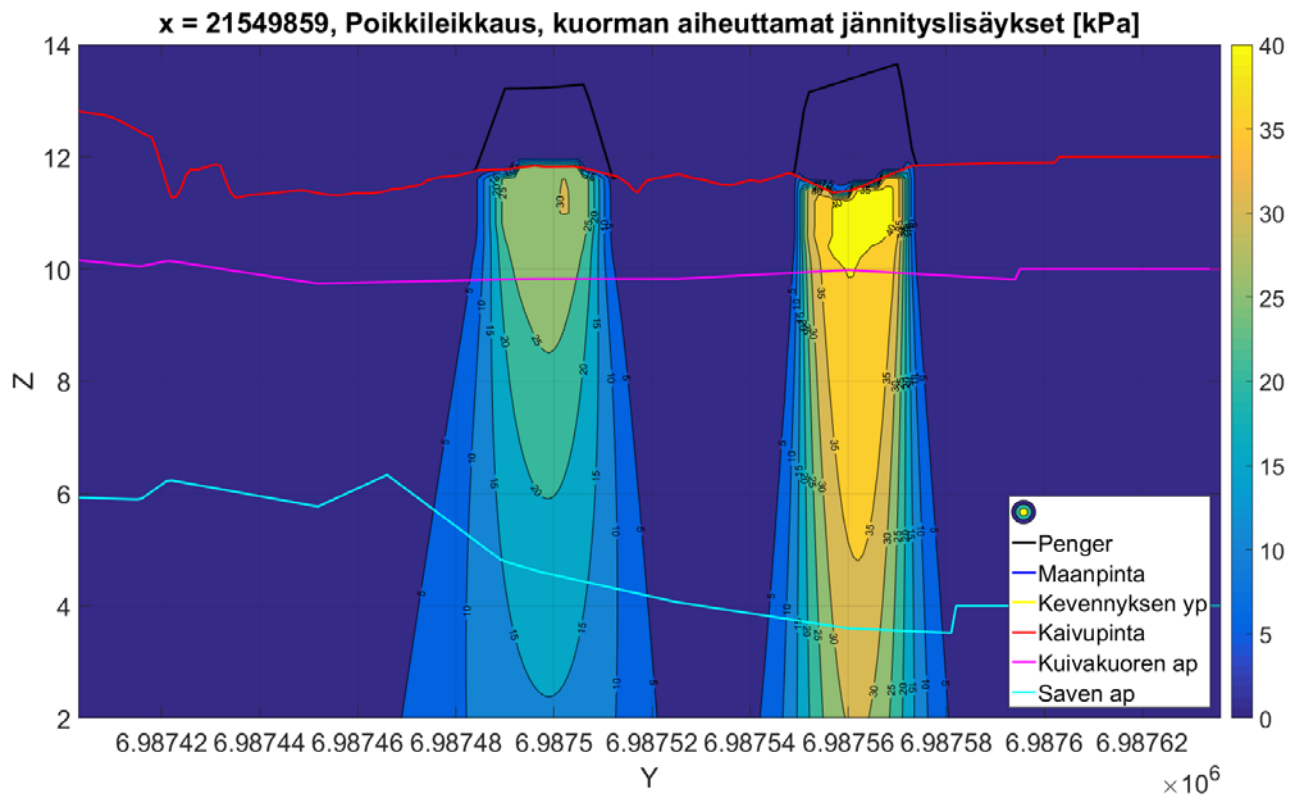


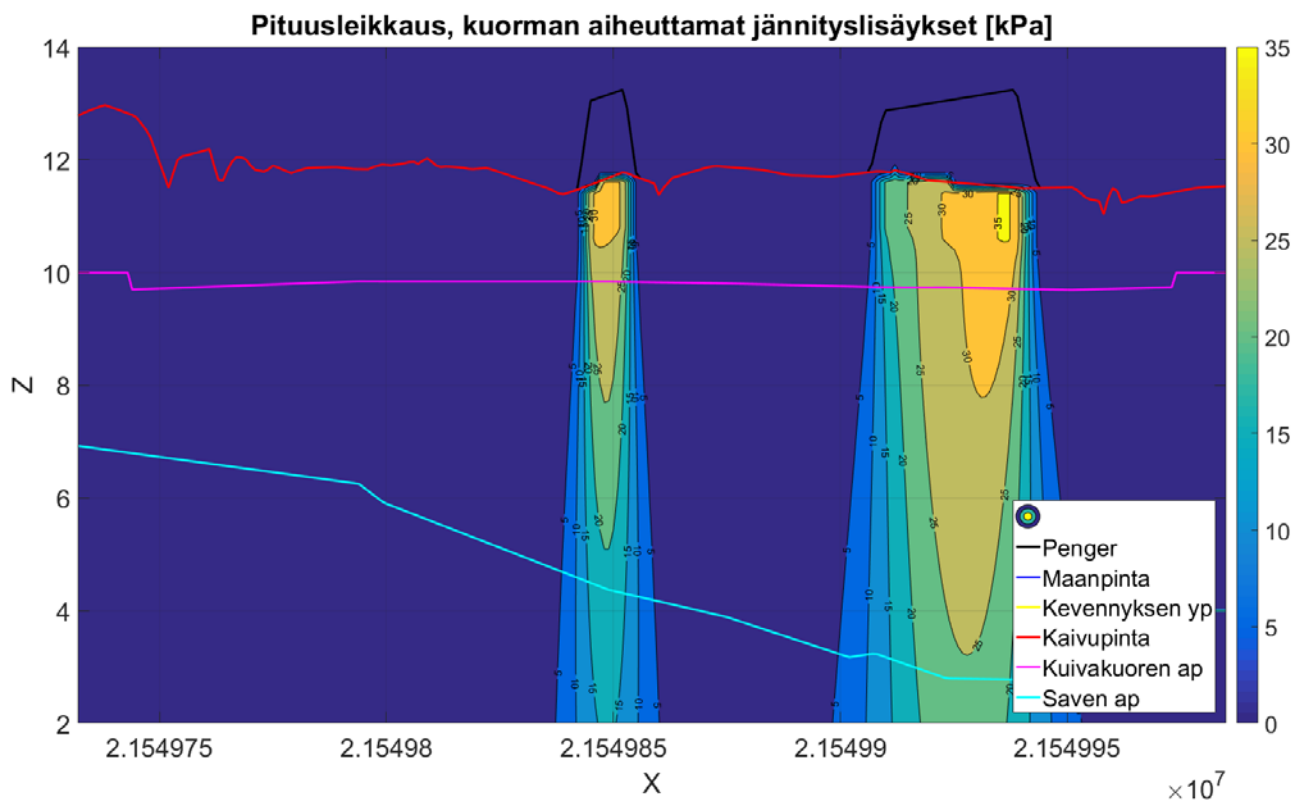
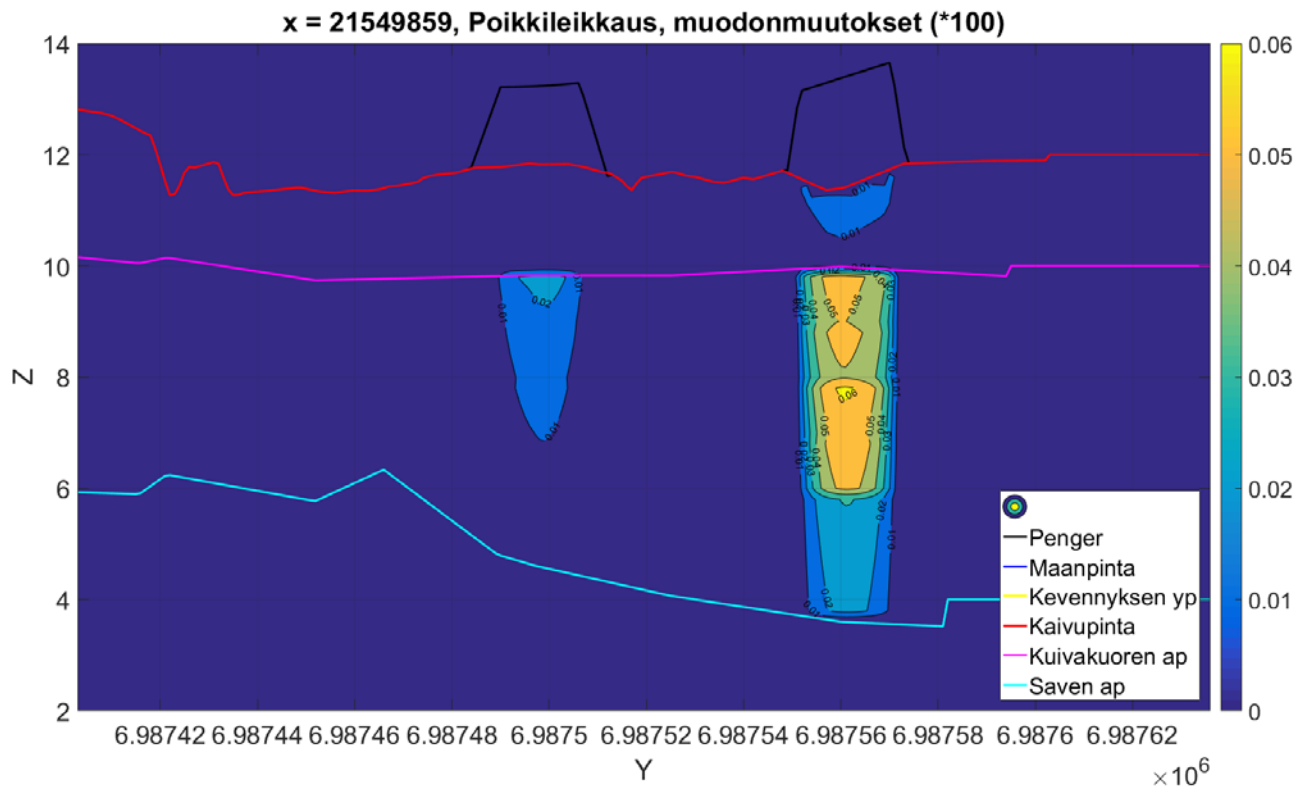


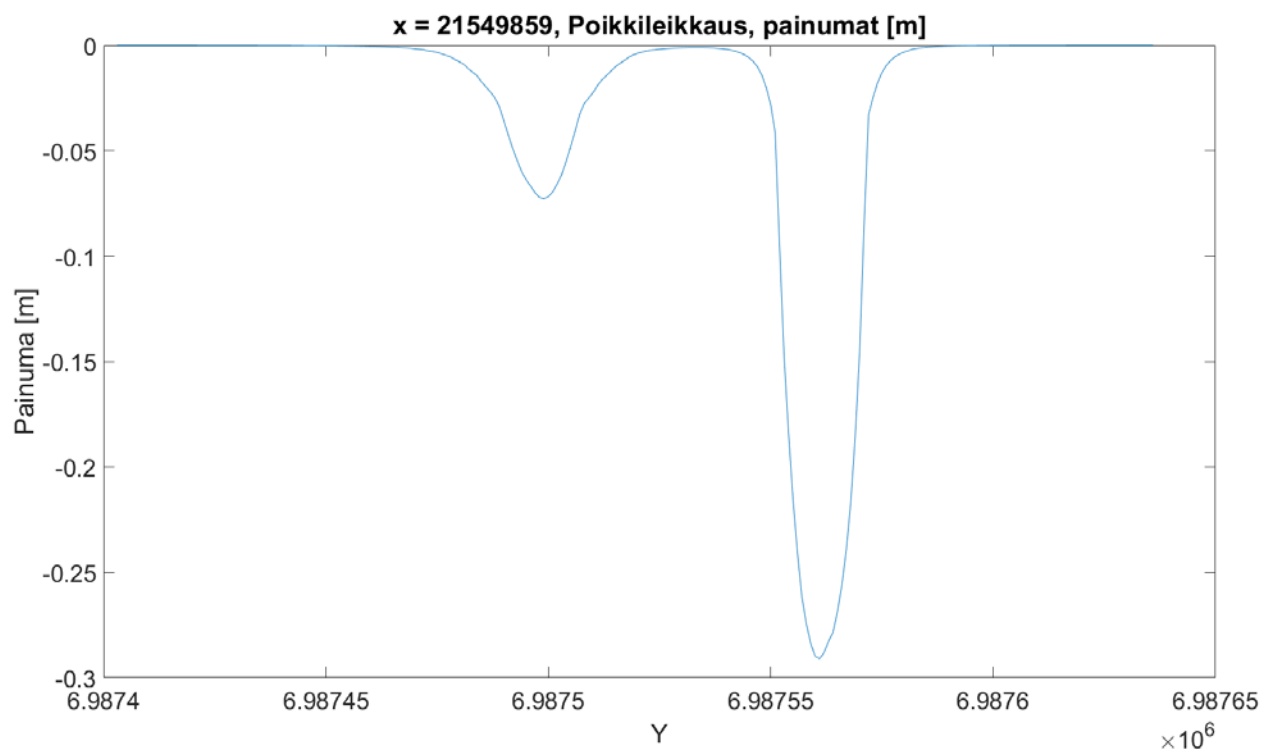
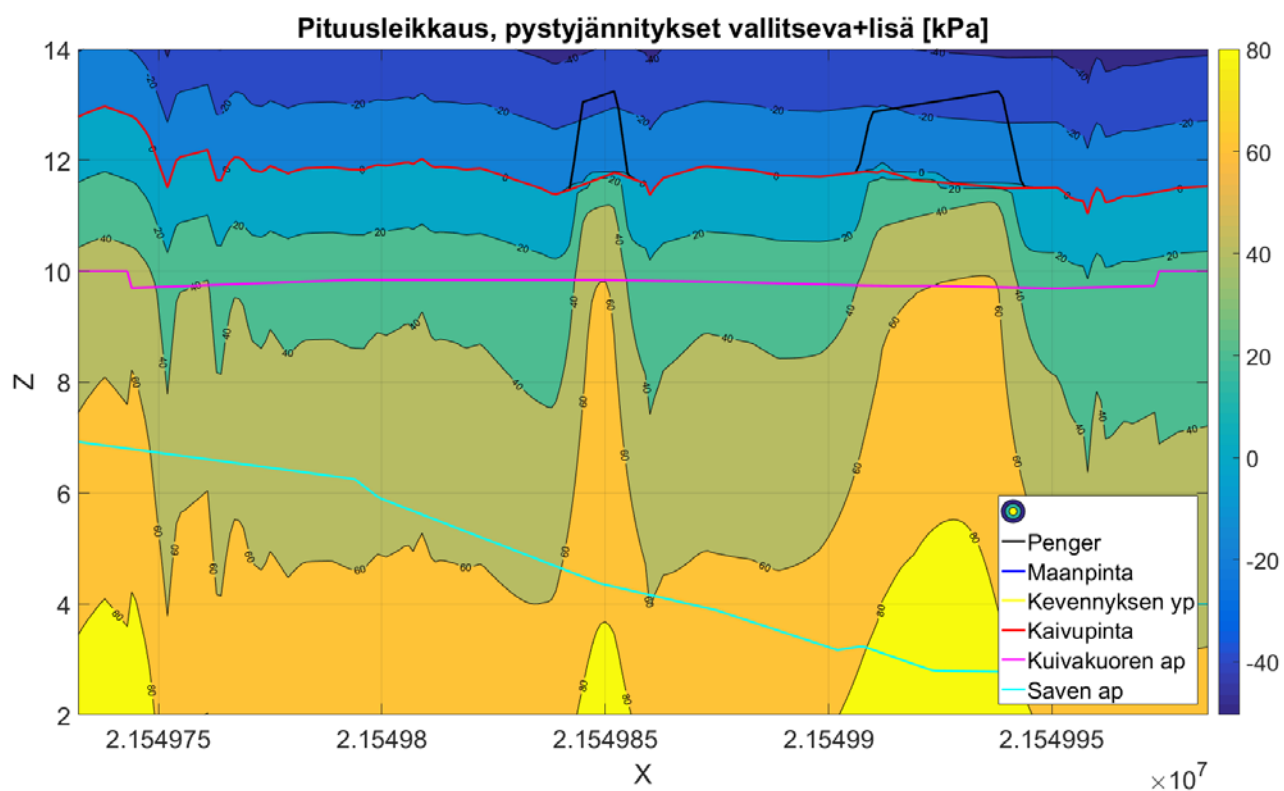


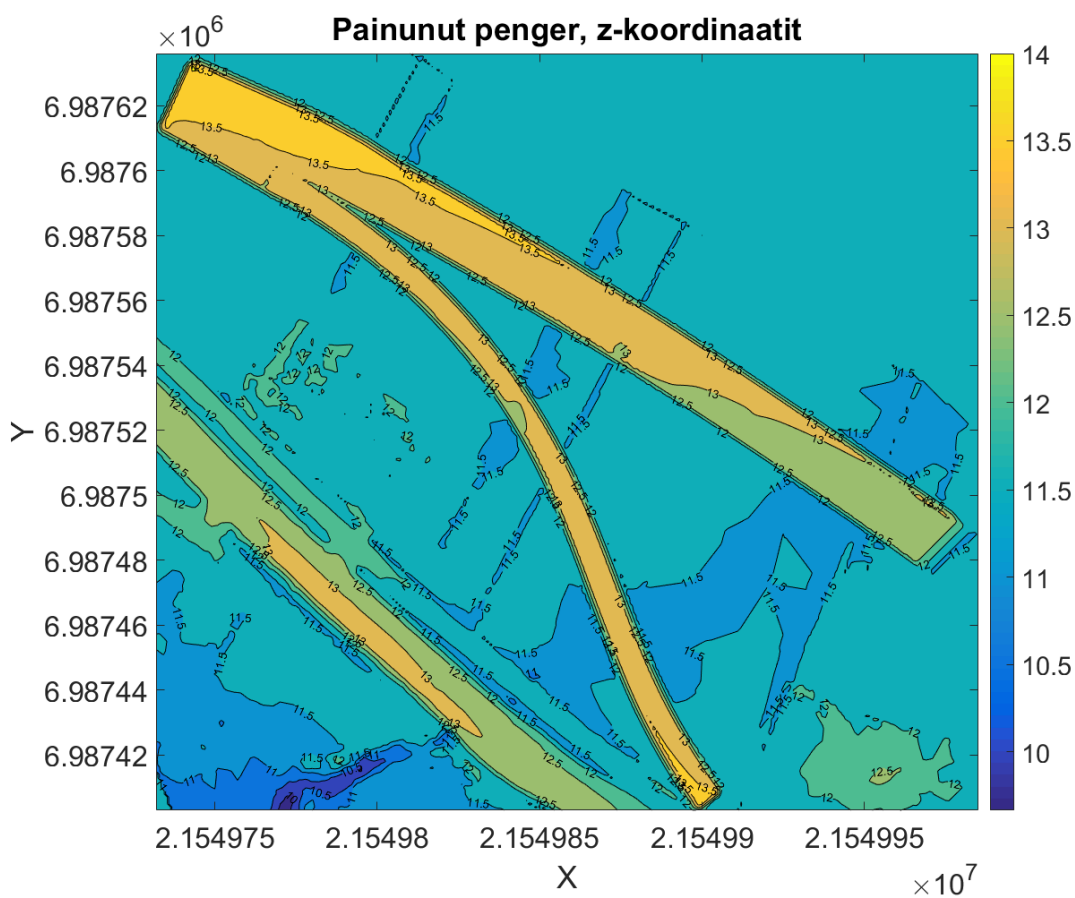
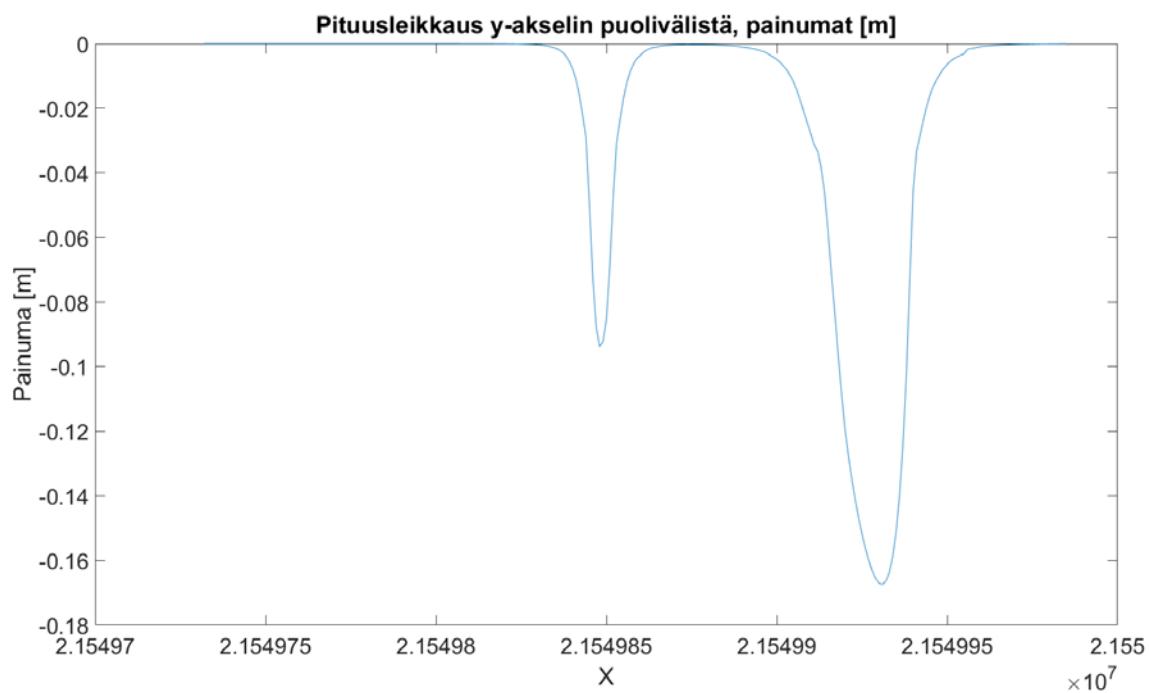


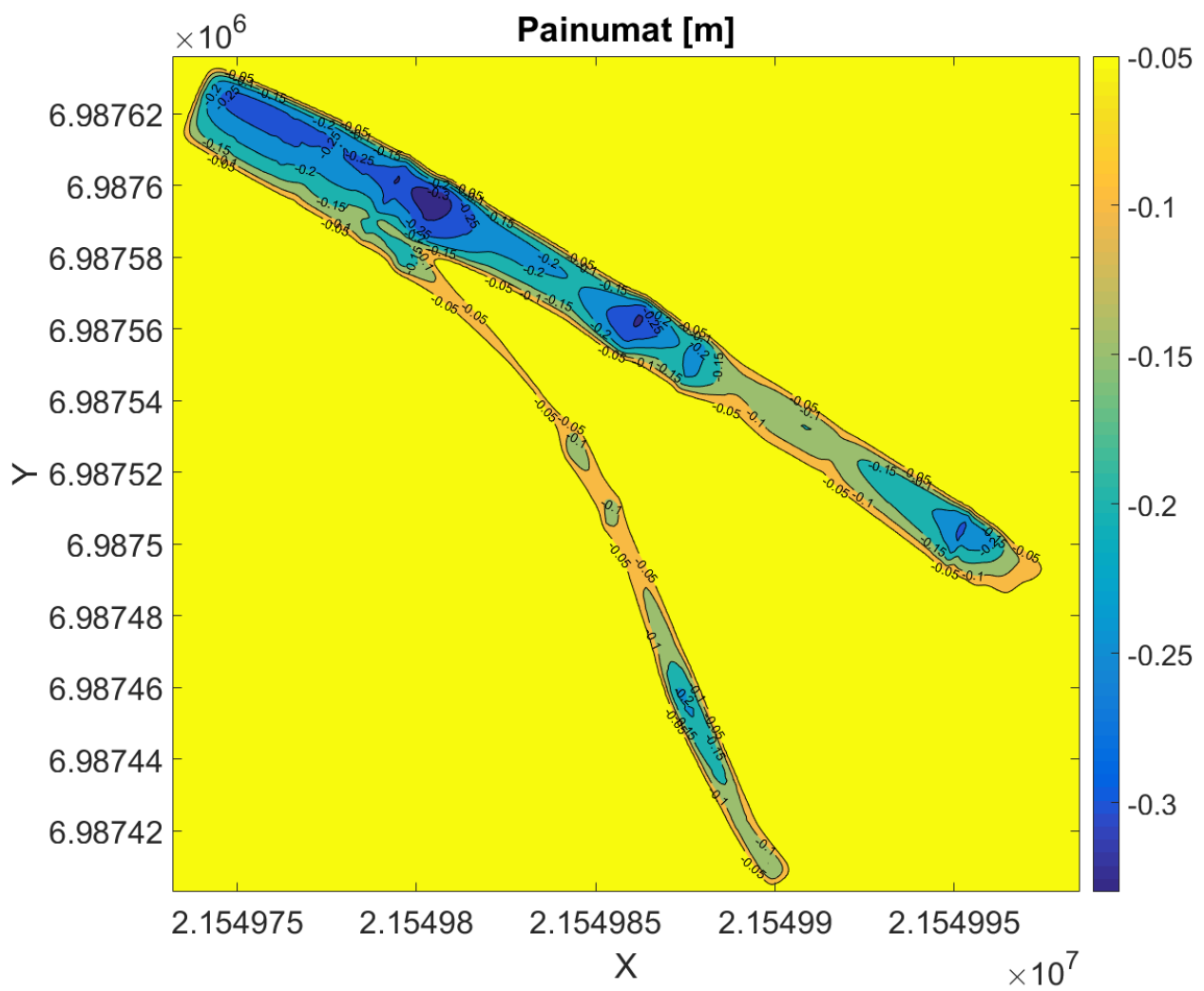
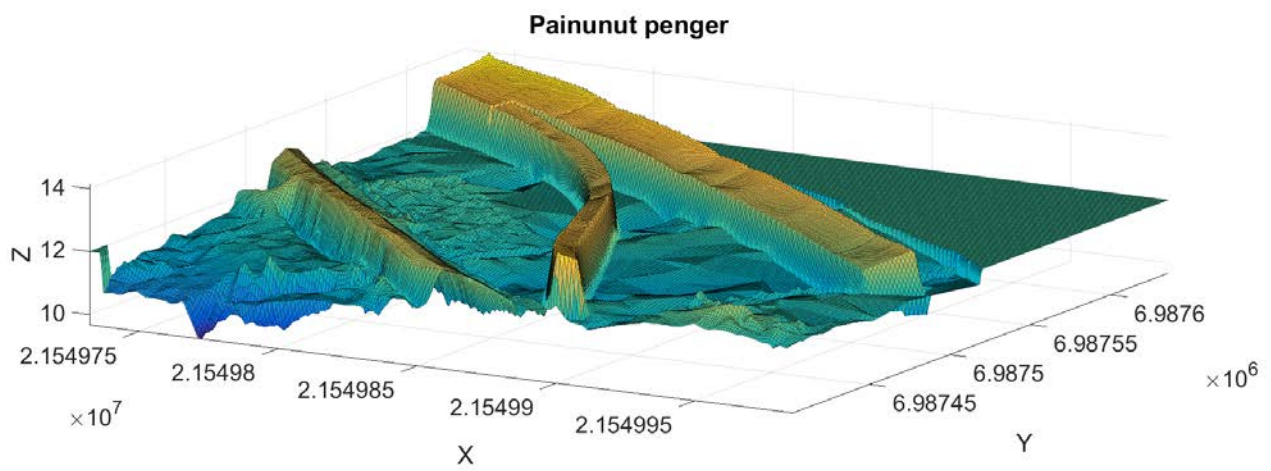


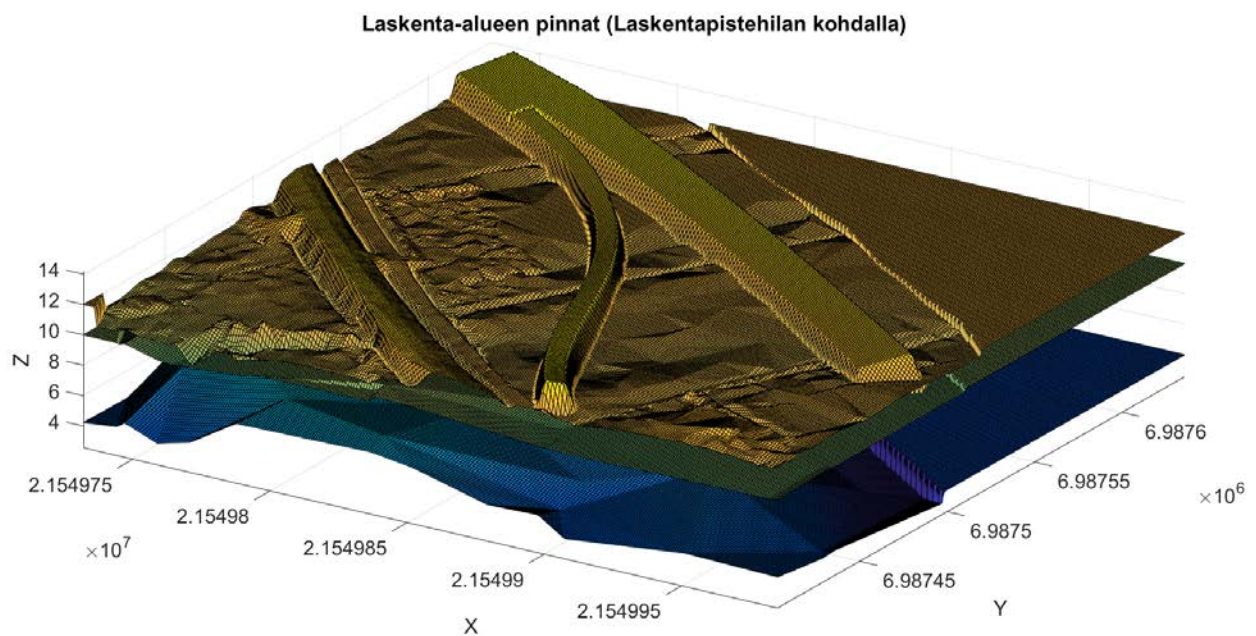
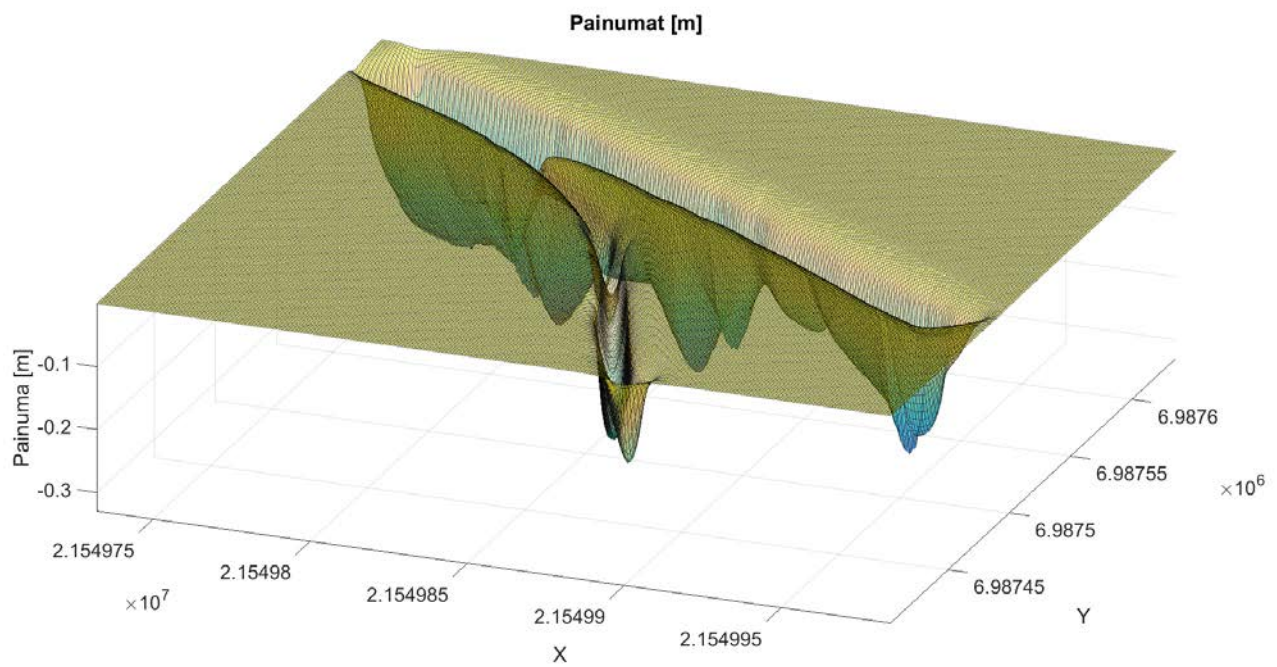




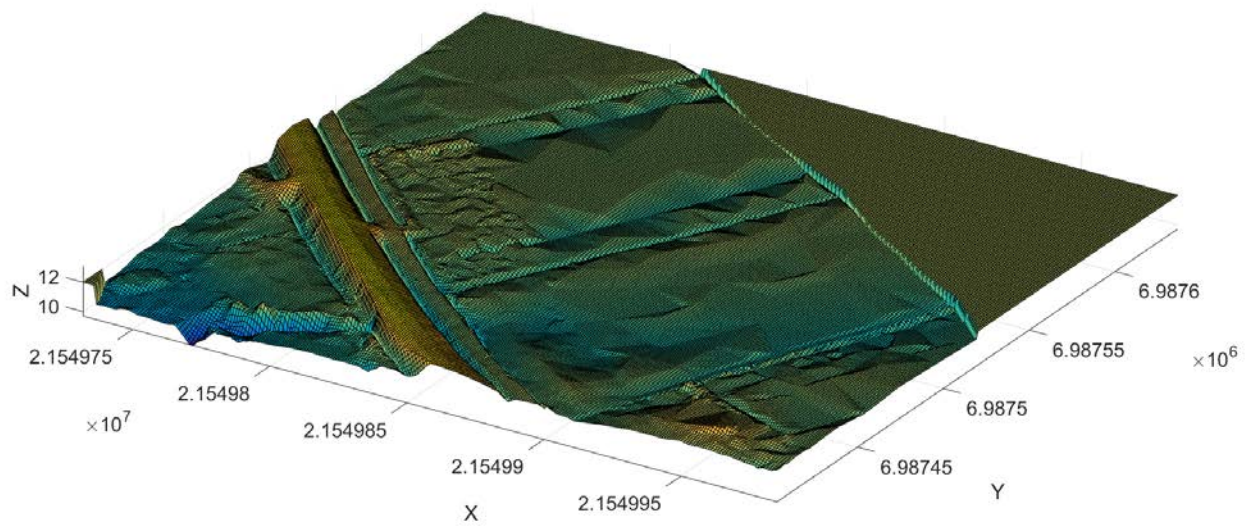




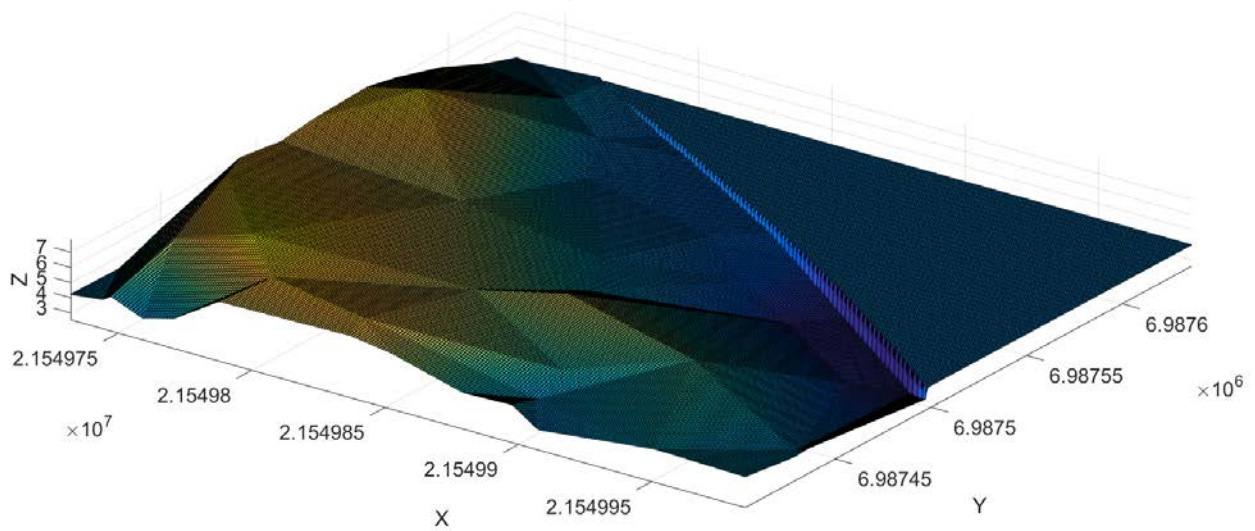




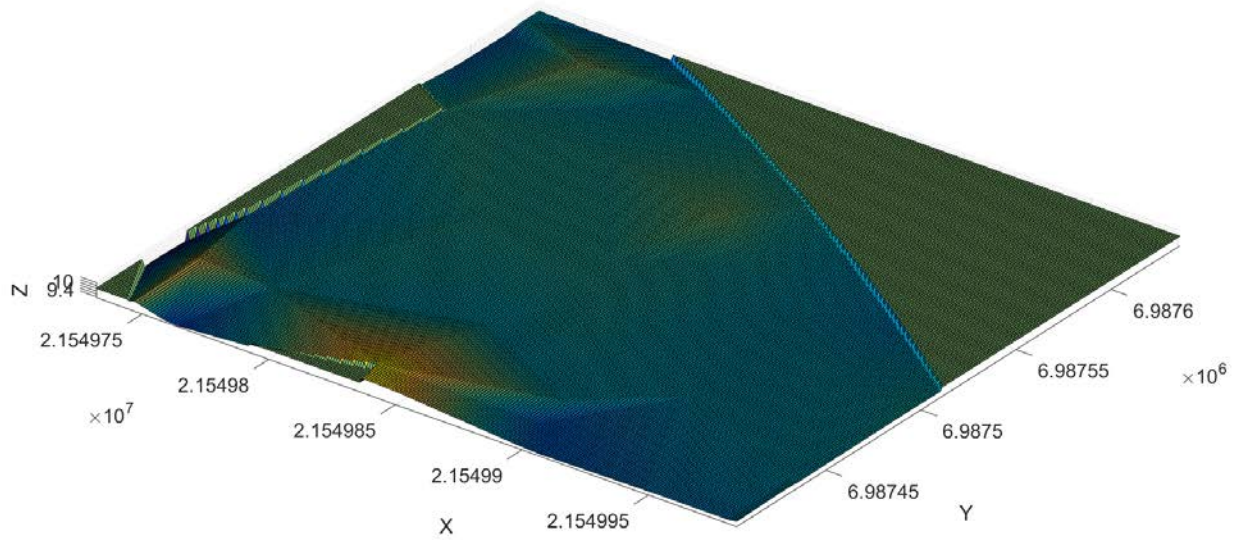
Kevennyksen yläpinta laskenta-alueella



Saven alapinta laskenta-alueella



Kuivakuoren alapinta laskenta-alueella



Kaivupinta ja kevennyksen yläpinta laskenta-alueella

